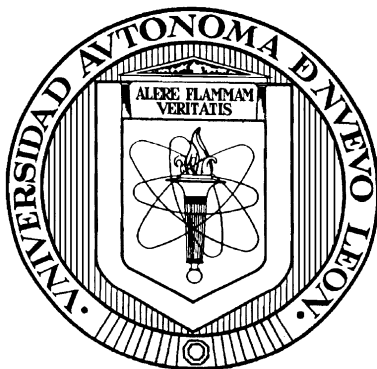


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**ESTUDIO DEL SISTEMA $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ EN CELDAS SOLARES
DE CAPA EXTREMADAMENTE DELGADA**

Por

LQI. ALI MARGOT HUERTA FLORES

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en
Química de Materiales**

D i c i e m b r e , 2 0 1 4

**ESTUDIO DEL SISTEMA $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ EN CELDAS SOLARES
DE CAPA EXTREMADAMENTE DELGADA**

Aprobación de la Tesis:

Dr. Eduardo Maximiano Sánchez Cervantes
Presidente

Dra. Nora Aleyda García Gómez
Secretario

Dr. Luis Carlos Torres González
Vocal

Dra. Ma. Araceli Hernández Ramírez
Vocal

Dra. Ma. Araceli Hernández Ramírez
Subdirectora de Estudios de Posgrado

**ESTUDIO DEL SISTEMA $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ EN CELDAS SOLARES
DE CAPA EXTREMADAMENTE DELGADA**

Revisión de la Tesis:

Dr. Eduardo Maximiano Sánchez Cervantes
Director de Tesis

Dra. Nora Aleyda García Gómez
Co-Directora de Tesis

Dra. Ma. Araceli Hernández Ramírez
Revisor

Dr. Edgar Jocsan Ruiz Ruiz
Revisor

Dr. Luis Carlos Torres González
Revisor

Dra. Ma. Araceli Hernández Ramírez
Subdirectora de Estudios de Posgrado

RESUMEN

LQI. Ali Margot Huerta Flores

Fecha de graduación: Noviembre, 2014

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título del estudio: ESTUDIO DEL SISTEMA $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ EN CELDAS SOLARES DE CAPA EXTREMADAMENTE DELGADA

Número de páginas: 165

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Química de Materiales

Área de estudio: Química de los Materiales

Propósito y método del estudio: El uso desmedido de los combustibles fósiles, así como la alerta constante de su agotamiento ha conducido los esfuerzos de la investigación en los recientes años hacia la búsqueda de fuentes alternas de energía. La energía solar constituye la mayor fuente de energía disponible sobre la Tierra, dentro de los dispositivos diseñados para su aprovechamiento destacan las celdas solares. La meta en el campo de investigación de las celdas solares es la construcción de celdas solares a partir de métodos de preparación sencillos y de bajo costo, usando materiales que permitan la obtención de eficiencias competitivas. En este trabajo se plantea la construcción de una celda solar de capa extremadamente delgada que emplea como semiconductor tipo n el TiO_2 , como material absorbente el sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ y como semiconductor tipo p el CuSCN , utilizando técnicas sencillas y versátiles de depósito, tales como spin coating y screen printing para el TiO_2 , el método silar para el material absorbente y el método de impregnación para el CuSCN .

Contribuciones y conclusiones: El presente trabajo de investigación establece las condiciones óptimas para el depósito de películas delgadas de TiO_2 por la técnica de spin coating, así como la viscosidad y el perfil de calcinación más recomendable para la preparación de películas rugosas de TiO_2 por la técnica de screen printing. Se establecen las condiciones óptimas para el depósito del sistema absorbente $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ por el método silar que permiten obtener una buena relación de absorbancia:espesor. Se reporta la construcción y caracterización la celda solar ETA $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3/\text{CuSCN}$, la cual emplea un diseño y un sistema de absorción novedoso, elaborada a partir de métodos sencillos y de bajo costo, usando materiales amigables con el medio ambiente. La celda solar ETA preparada arrojó una eficiencia de 4.9%, el cual es un valor competitivo dentro de las celdas que emplean este diseño.

Firma del asesor:_____

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, el Sr. Carlos Huerta Rodríguez y la Sra. Ma. Julia Flores Medellín, por todo su cariño, apoyo e impulso constante en cada etapa de mi vida, cada uno de mis logros es para ustedes.

A mis hermanas: Karla, Julia, Karen y Magaly, por acompañarme siempre, incondicionalmente, en este viaje.

A mi director de tesis, el Dr. Eduardo Sánchez Cervantes, por permitirme trabajar en su grupo de investigación y compartir sus valiosos conocimientos conmigo.

Al Dr. Luis Carlos Torres González, la Dra. Araceli Hernández Ramírez, el Dr. Edgar Jocsan Ruiz Ruiz y la Dra. Nora Aleyda García Gómez, por sus conocimientos impartidos, su orientación, consejos e importantes aportaciones que enriquecieron grandemente mi trabajo.

A la Facultad de Ciencias Químicas, la División de Estudios Superiores y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por los apoyos otorgados durante el desarrollo de este trabajo.

A la Secretaría de Energía, por el apoyo brindado a través del proyecto 150-111.

Agradezco especialmente a la Dra. Lorena Garza Tovar, el Dr. Isaías Juárez Ramírez, la Dra. Bertha Alicia Vázquez Méndez, el Dr. Juan Manuel Alfaro Barbosa y al Dr. Antonio López Pérez por su disposición, ayuda y grandes enseñanzas durante este tiempo, constituyeron una guía y un ejemplo a seguir para mí.

A mis compañeros de laboratorio: M.C. Rubí Aglaé Hernández Carrillo, M.C. Miguel Ángel Velasco Soto, I.Q. Celene Frago Fernández, M.C. Víctor Gallegos Sánchez y los estudiantes Luis Gilberto Domínguez López y Jorge Plata, por su enorme ayuda en innumerables ocasiones y por todo lo que aprendí de ellos.

A mis compañeros de posgrado y amigos: M.C. Adriana Romo, Dra. Margarita Loredo Cansino, M.C. José Martín Rosas, M.C. Mirtala Santana, M.C. Ma. Concepción García y al Dr. Rodrigo Chan Navarro, por los momentos compartidos y su invaluable amistad que me llevo.

A los integrantes del grupo Bio-kém, por transmitirme su gran energía de trabajo y sus valores de esfuerzo constante e innovación.

A mis amigos: M.A. Daniel Torres, Ing. Eduardo Presas, Ing. Fernando Cadena, Lic. Melisa Fernández, Ing. Denisse Medrano, M.C. Francisco Vázquez, LQI. Magda Hernández Tristán, QFB. Yazmín García, LQI. Isidro de León Abarte, QBP. José Ángel González, I.M. Claudia Compeán, M.C. Rubén Ahumada, I.M. Iván Castañeda, I.Q. Sergio López, LQI. Omar Carrasco, Dr. Christian Gómez Solís, Dr. Juan Carlos Ballesteros y a la Dra. Elvira Zarazúa Morín, por estar al pendiente de mis contratiempos y logros y desearme siempre lo mejor.

A la señorita Karina Navarro, por la atención y amabilidad brindadas durante mi estancia en la escuela de graduados.

A la Dra. Idalia Gómez de la Fuente por su apoyo invaluable, su tiempo y el compromiso personal que tomó para ayudarme a ver finalizado este proyecto, así como a todas las personas del posgrado de la Facultad de Ciencias Químicas que contribuyeron en cada paso a la realización del mismo.

Finalmente, agradezco a la Dra. Leticia Torres Martínez por creer en mí, respaldar mis sueños y alentarme a alcanzar mis metas. Gracias por renovar mis ideas, inspirar mi mundo y motivarme a dar lo mejor de mí para éste, son infinitas mi admiración y mis gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, Carlos y Ma. Julia, por el regalo de la vida, el amor y por hacer de mí la persona que soy.

A mis abuelitos Simón, Andrea y Julia; por ser un ejemplo de lucha y tesón en la vida y por haber llenado de bellos recuerdos mi infancia.

*“Vale más la sabiduría que el oro, y la inteligencia más que la plata: hónralas y
te honrarán cada día de tu vida”*

Proverbios 16:16

ÍNDICE GENERAL

	Página
Capítulo I. Introducción y Antecedentes	1
I.1 Introducción	1
I.2 Energía solar	2
I.2.1 Energía solar en México	3
I.2.2 Aplicaciones de la energía solar	5
I.3 Celdas solares	6
I.3.1 Efecto fotoeléctrico	7
I.3.2 Componentes básicos de una celda solar	8
I.3.2.1 Semiconductores	10
I.3.2.2 Clasificación de los semiconductores	14
I.3.3 Funcionamiento de una celda solar	15
I.3.4 Características de las celdas solares	16
I.4 Clasificación de las celdas solares	18
I.4.1 Celdas solares de primera generación	18
I.4.2 Celdas solares de segunda generación	19
I.4.3 Celdas solares de tercera generación	20
I.5 Celda solar sensibilizada con colorante	21
I.6 Celda solar sensibilizada con puntos cuánticos	22
I.7 Celda solar de capa extremadamente delgada	24

I.8	Antecedentes	29
I.9	Justificación	33
I.10	Hipótesis	33
I.11	Objetivos	34
I.11.1	Objetivo General	34
I.11.2	Objetivos Específicos	34
Capítulo II. Materiales y Métodos		36
II.1	Etapas 1: Selección de los materiales para la construcción de la celda solar ETA	37
II.2	Etapas 2: Selección de los métodos de preparación	38
II.2.1	Selección del método de preparación de la capa de semiconductor tipo n	38
II.2.1.1	Selección del método de preparación de la capa densa de semiconductor tipo n	39
II.2.1.2	Selección del método de preparación de la capa rugosa de semiconductor tipo n	41
II.2.2	Selección del método de preparación de la capa absorbente	42
II.2.3	Selección del método de preparación de la capa de semiconductor tipo p	46
II.3	Etapas 3: Preparación de los materiales y construcción de la celda solar ETA	47

II.3.1	Preparación de la capa de semiconductor tipo n	47
II.3.1.1	Preparación de la capa densa de semiconductor tipo n	48
II.3.1.2	Preparación de la capa rugosa de semiconductor tipo n	52
II.3.2	Preparación de la capa absorbente	54
II.3.3	Preparación de la capa de semiconductor tipo p	57
II.3.4	Construcción de la celda solar ETA	58
II.4	Etapas 4: Caracterización de los materiales y de la celda solar ETA	58
II.4.1	Caracterización de los materiales	58
II.4.1.1	Espectroscopia de Ultravioleta Visible	58
II.4.1.2	Microscopia Electrónica de Barrido	61
II.4.1.3	Microscopia de Fuerza Atómica	62
II.4.1.4	Difracción de Rayos X	63
II.4.2	Caracterización de la celda solar ETA	64
II.4.2.1	Curvas de corriente-potencial (I-V)	64
Capítulo III. Resultados y Discusión		67
III.1	Evaluación de las condiciones de depósito de los materiales	67
III.1.1	Evaluación de las condiciones de depósito de la capa densa de semiconductor tipo n	67

III.1.2	Evaluación de las condiciones de depósito de la capa rugosa de semiconductor tipo n	74
III.1.2.1	Efecto de la viscosidad de la pasta	74
III.1.2.2	Efecto del perfil de calcinación	76
III.1.3	Evaluación del efecto del número de ciclos y de las condiciones de depósito de la capa absorbente	79
III.1.3.1	Efecto del número de ciclos	79
III.1.3.2	Evaluación de las condiciones de depósito de la capa absorbente	84
III.2	Caracterización de los materiales	88
III.2.1	Caracterización de la capa densa de semiconductor tipo n	88
III.2.1.1	Espectroscopia de Ultravioleta Visible	89
III.2.1.2	Difracción de Rayos X	91
III.2.1.3	Microscopia Electrónica de Barrido	93
III.2.1.4	Microscopia de Fuerza Atómica	94
III.2.2	Caracterización de la capa rugosa de semiconductor tipo n	96
III.2.2.1	Espectroscopia de Ultravioleta Visible	96
III.2.2.2	Difracción de Rayos X	98
III.2.2.3	Microscopia Electrónica de Barrido	100
III.2.2.4	Microscopia de Fuerza Atómica	101
III.2.3	Caracterización de la capa absorbente	103
III.2.3.1	Espectroscopia de Ultravioleta Visible	103

III.2.3.2	Difracción de Rayos X	105
III.2.3.3	Microscopia Electrónica de Barrido	106
III.2.3.4	Microscopia de Fuerza Atómica	108
III.2.4	Caracterización de la capa de semiconductor tipo p	109
III.2.4.1	Espectroscopia de Ultravioleta Visible	109
III.2.4.2	Difracción de Rayos X	111
III.2.4.3	Microscopia Electrónica de Barrido	112
III.2.4.4	Microscopia de Fuerza Atómica	113
III.3	Caracterización de la celda solar ETA	114
III.3.1	Curva de corriente-potencial (I-V)	114
Capítulo IV. Conclusiones		122
Capítulo V. Recomendaciones para trabajo futuro		126
Capítulo V. Referencias		128
Apéndice A. Propiedades de los materiales empleados en la construcción de la celda solar		142
Apéndice B. Diseño de experimentos		150
Apéndice C. Análisis estadístico ANOVA		154
Apéndice D. Glosario de términos de energía solar		162

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Radiación global media diaria en el territorio de México.	4
2. Efecto fotoeléctrico.	8
3. Diagrama típico de una celda solar.	9
4. Diagrama de bandas en un semiconductor.	11
5. Representación del modelo del par hueco-electrón.	12
6. Espectro electromagnético.	13
7. Curva I-V característica de una celda solar.	18
8. Esquema de una celda solar nanocristalina tipo Grätzel.	22
9. Sensibilización esperada de puntos cuánticos del semiconductor InP impregnado sobre nanopartículas de TiO_2 .	23
10. Modelo de bandas de la interacción interfacial entre el semiconductor TiO_2 y el semiconductor cuántico InP.	23
11. (a) Representación y (b) Diagrama de bandas idealizado para una celda solar ETA.	25
12. (a) Estructura y (b) diagrama de bandas esperado para la celda solar ETA propuesta en este trabajo.	32
13. Depósito de películas delgadas por el método spin coating.	40

14. Depósito de películas por el método screen printing.	41
15. Esquema general del método silar.	44
16. Esquema general del método de recubrimiento por impregnación.	47
17. Modelo de spin coater utilizado para el depósito de las películas.	49
18. Malla utilizada para el depósito por screen printing.	53
19. Gráfica de respuesta para evaluar el efecto de cada factor sobre la absorbancia en el diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.	60
20. Morfología de las películas de TiO_2 preparadas por screen printing usando 4 perfiles de calcinación diferentes: (a) 400°C -30 min, (b) 400°C -60 min, (c) 450°C -30 min y (d) 450°C -60 min.	61
21. (a) Absorbancia obtenida de las películas depositadas por el método silar con un número de ciclos de 0 a 9 del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ y (b) efecto del número de ciclos sobre la absorbancia de las películas a 590 nm y 688 nm.	62
22. Rugosidad obtenida de las películas preparadas con diferente número de ciclos de depósito de material absorbente.	64
23. Gráfica de respuesta para evaluar el efecto de cada factor sobre la absorbancia en el diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.	65
24. Gráfica de Kubelka Munk de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.	72
25. Curva Tauc de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.	77
26. Patrón de difracción de rayos X de la película de TiO_2 preparada por	81

la técnica de spin coating.

27. Imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.	83
28. Imágenes obtenidas del análisis (a) seccional y (b) tridimensional por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.	87
29. Gráfica de Kubelka Munk de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.	90
30. Curva Tauc de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.	91
31. Patrón de difracción de rayos X de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.	92
32. Imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.	94
33. Imágenes obtenidas del análisis (a) seccional y (b) tridimensional por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.	95
34. Espectro de absorción de la capa absorbente comparado con el de la capa densa de TiO_2 y la capa rugosa de TiO_2 .	96
35. Patrón de difracción de rayos X de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar sobre una capa densa y una capa rugosa de TiO_2 .	98
36. (a) Imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar sobre una capa densa y una capa rugosa de TiO_2 y (b)	99

Mapeo elemental efectuado por Espectroscopia de Energía de Rayos X sobre la superficie de la película.	
37. Imágenes obtenidas del análisis (a) seccional y (b) tridimensional por Microscopia de Fuerza Atómica de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar.	101
38. Gráfica de Kubelka Munk de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.	102
39. Curva Tauc de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.	104
40. Patrón de difracción de rayos X de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.	105
41. (a) Imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación sobre la capa de material absorbente y (b) Mapeo elemental efectuado por Espectroscopia de Energía de Rayos X sobre la superficie de la película.	107
42. Imágenes obtenidas del análisis (a) seccional y (b) tridimensional por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.	108
43. Curva corriente-potencial (I-V) obtenida al iluminar la celda solar ETA $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3/\text{CuSCN}$ con una lámpara de xenón a 500 W/m^2 de iluminación (AM 1.5 y $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).	109
44. Esquema de las estructuras de las fases cristalinas a) anatasa, b) rutilo y c) brookita.	110
45. Estructura cristalina del $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$.	111

46. Estructura cristalina de la fase estibnita del Sb_2S_3 .	112
47. Estructura cristalina de la fase β -CuSCN.	113
48. Esquema general de un proceso representado como una caja negra.	115
49.	144
50.	147
51.	148
52.	149
53.	151

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
I. Resumen cronológico de las investigaciones más relevantes de celdas solares de capa de absorción extremadamente delgada.	30
II. Diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.	51
III. Resumen de los experimentos resultantes del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.	51
IV. Perfiles de calcinación estudiados sobre las películas de TiO ₂ .	54
V. Diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.	56
VI. Experimentos resultantes del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9 para evaluar las condiciones de depósito de la capa absorbente.	57
VII. Absorbancia de las películas de TiO ₂ preparadas por la técnica de spin coating bajo las condiciones derivadas del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.	69
VIII. Absorbancia promedio de los experimentos estudiados al mismo nivel de cada factor en el diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.	71
IX. Viscosidad obtenida de las pastas a diferentes tiempos de evaporación y análisis visual de las películas preparadas con las mismas.	75

X.	Resumen del efecto del perfil de calcinación sobre la morfología y la rugosidad de las películas de TiO_2 preparadas por screen printing.	78
XI.	Absorbancia de las películas de $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ preparadas por el método silar bajo las condiciones derivadas del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.	85
XII.	Absorbancia promedio de los experimentos estudiados al mismo nivel de cada factor en el diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.	86
XIII.	Resumen de los parámetros obtenidos de la caracterización de la celda solar ETA $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3/\text{CuSCN}$.	118
XIV.	Comparación de los parámetros obtenidos en celdas solares ETA relacionadas con este trabajo.	119
XV.	Propiedades de las fases cristalinas anatasa, rutilo y brookita.	144
XVI.	Valores de movilidad de electrones y masa efectiva de los polimorfos anatasa y rutilo medidos en cristal y películas policristalinas.	145
XVII.	Propiedades de las fases cristalinas del In_2S_3 .	146
XVIII.	Análisis de varianza del factor velocidad de depósito.	154
XIX.	Análisis de varianza del factor tiempo de rotación.	155
XX.	Análisis de varianza del factor cantidad de solución de precursor.	156
XXI.	Análisis de varianza del factor perfil de calcinación.	156
XXII.	Análisis de varianza del factor relación estequiométrica	157

tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina.

XXIII. Análisis de varianza del factor concentración de la sal metálica.	158
XXIV. Análisis de varianza del factor tiempo de inmersión.	159
XXV. Análisis de varianza del factor temperatura de calcinación.	160
XXVI. Análisis de varianza del factor tiempo de calcinación.	161

NOMENCLATURA

ETA	Extremely thin absorber
QD	Quantum dot
p	Semiconductor tipo p
n	Semiconductor tipo n
eV	Electrón-volt
W	Watt
V	Volt
Isc	Coriente a corto circuito
Voc	Voltaje a circuito abierto
Pmax	Potencia máxima
FF	Factor de llenado
rpm	Revoluciones por minuto
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido
AFM	Microscopia de Fuerza Atómica
DRX	Difracción de Rayos X
TTIP	Tetraisopropóxido de titanio
DEA	Dietanolamina
SILAR	Successive ionic layer adsorption and reaction
ITO	Óxido de estaño dopado con indio ($\text{SnO}_2:\text{In}$)
ICDD	Centro Internacional de Datos de Difracción

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

I.1 Introducción

Desde el inicio de la revolución industrial en el siglo XIX y la inminente llegada de máquinas cada vez más complejas, las necesidades energéticas del hombre han ido en aumento. En estos días, el 85% de la demanda energética global es cubierta por la explotación de combustibles fósiles. Se prevé que esta demanda aumentará en los próximos veinte años a una media de 1.6% por año^[1].

La principal desventaja de los combustibles fósiles radica en los numerosos problemas ambientales derivados de su uso desmedido, tales como el calentamiento global, adjudicado a la emisión de gases de invernadero, así como la alerta constante de su agotamiento.

Desde la crisis energética experimentada a finales de 1970^[2], el desarrollo de tecnologías limpias y accesibles a partir de fuentes renovables de energía ha tomado una importancia crucial a nivel mundial.

I.2 Energía solar

Dentro de las energías renovables, la energía solar es considerada como una de las alternativas más viables para ser utilizada, ya que representa la mayor fuente de energía disponible sobre la Tierra: cada día inciden sobre la superficie terrestre aproximadamente 1000 watts por metro cuadrado en condiciones naturales^[3].

La energía solar puede describirse en términos de radiación electromagnética. Desde el Sol hacia la Tierra viaja un haz de luz, la radiación solar. Este haz de luz es energía electromagnética que surge de los procesos de fusión del hidrógeno contenido en el Sol^[4].

La cantidad de esta energía fuera de la atmósfera la define la constante solar. En particular, se define como constante solar la cantidad de energía que es captada en el espacio fuera de la atmósfera por una superficie de un metro cuadrado en un segundo, a la distancia media de la Tierra al Sol ($C = 1.361 \text{ W/m}^2$)^[5].

La energía asociada al enorme flujo de radiación emitido por el Sol y capturado por la Tierra es el origen de la vida y lo que permite que ésta se perpetúe. Casi todas las formas de energía tienen su origen directa o indirectamente en el sol.

La energía solar es una de las fuentes de energía alterna más importante debido al gran número de ventajas que presenta, entre ellas que representa un recurso natural disponible para ser aprovechado, no genera contaminación y puede ser utilizada en ubicaciones remotas.

Uno de los inconvenientes que presenta es que la instalación de los dispositivos para el aprovechamiento de la energía solar puede requerir gran espacio, además de que los costos iniciales pueden ser altos. Asimismo, en algunos lugares donde la luz solar no tiene la intensidad suficiente para proporcionar un flujo de energía permanente pueden presentarse problemas para su aprovechamiento eficiente^[6]. Este no es el caso de México, ya que nuestro país cuenta con una buena captación de luz solar en la mayoría de su territorio, tal como se describe en la siguiente sección.

I.2.1 Energía solar en México

México es un país con un potencial enorme para el aprovechamiento de la energía solar. De acuerdo a la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA) se encuentra dentro del Cinturón Solar, el cual está compuesto por 66 países ubicados entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio.

México está en tercer lugar entre los países con mayor atracción de inversión en energía solar en el mundo después de China y Singapur, y por

encima de Brasil, Chile y la India. Como se puede apreciar en la Figura 1, en México tenemos entre 4.7 y 5.8 kW/m² de radiación solar^[7].

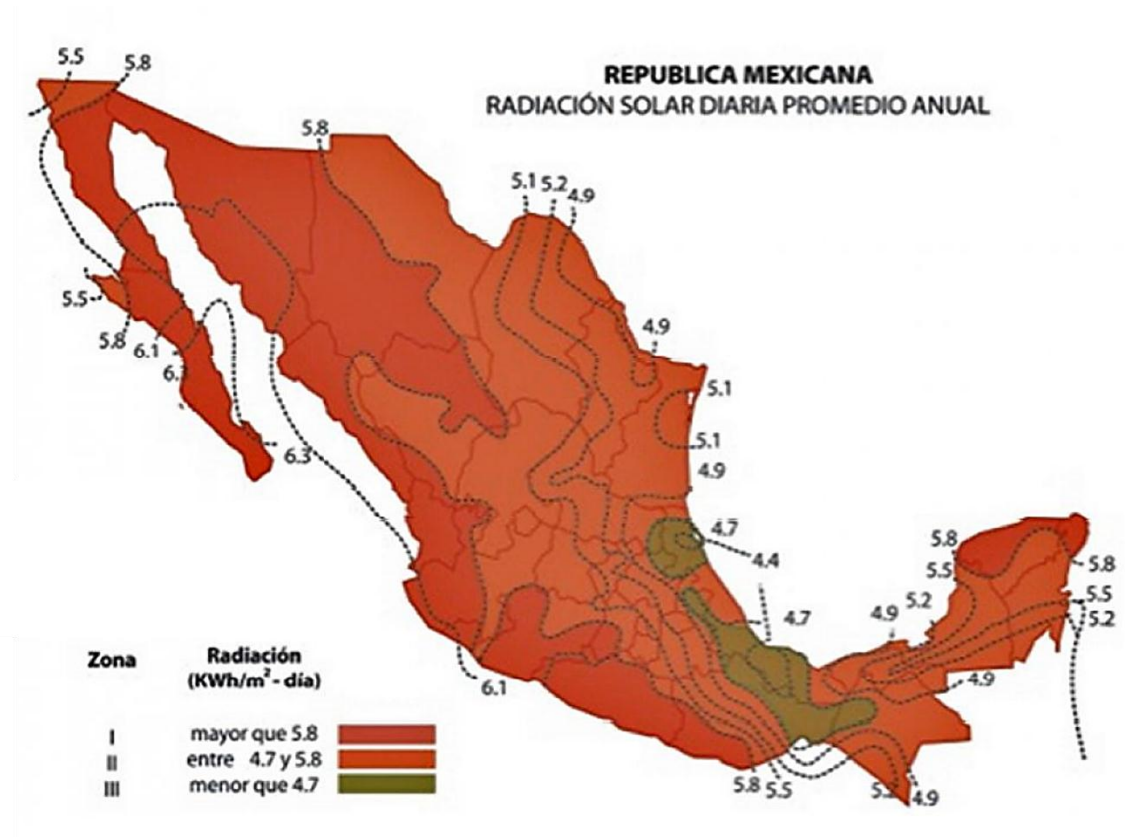


Figura 1. Radiación global media diaria en el territorio de México^[7].

Por esta y muchas otras razones, la energía solar tiene un enorme futuro en México, por lo que debe fomentarse la investigación y el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de este recurso.

I.2.2 Aplicaciones de la energía solar

Dentro de las aplicaciones de la energía solar destacan: calefacción doméstica, refrigeración, calentamiento de agua, destilación, generación de energía, fotosíntesis, hornos solares, cocinas, evaporación, acondicionamiento de aire, control de heladas, secado de hierbas y frutas, entre otras. En seguida se presentan otras aplicaciones de acuerdo a su clasificación^[8]:

- **Aplicación directa:** Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.
- **Aplicación térmica:** Se denomina térmica a la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, la calefacción, refrigeración y el secado son aplicaciones térmicas. La energía solar térmica de uso para la calefacción se obtiene por lo general con los colectores solares térmicos, que convierten en calor entre un 40% y un 75% de la energía recibida.
- **Aplicación fotovoltaica:** Se llama fotovoltaica a la energía solar aprovechada por medio de celdas solares capaces de convertir la luz en

un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico. Las aplicaciones más importantes de esta tecnología están reflejadas en las celdas solares.

I.3 Celdas solares

Las celdas solares son utilizadas actualmente en satélites, relojes, calculadoras y otros dispositivos^[9]. El principio básico de funcionamiento de una celda solar está descrito por el efecto fotoeléctrico, descubierto en 1839 por Alexandre Becquerel^[10]. De manera sencilla, podemos decir que el efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones cuando se hace incidir sobre un material una radiación electromagnética.

Más tarde, en 1873, Willoughby Smith observó el efecto fotoeléctrico en el selenio sólido^[11] y en 1883 fue construida la primera celda solar por Charles Fritts con selenio unido a una pequeña lámina de oro, la cual presentó una eficiencia de un 1%^[12]. Desde entonces ha habido una gran cantidad de avances en este campo.

En 1947, en los laboratorios Bell se comenzó el estudio de las propiedades del silicio; para 1954 se elaboró la primera celda solar de silicio. Esta celda dio origen a la primera estructura que lograba convertir luz en electricidad con una eficiencia razonable (6%)^[13]. En 1955 se desarrolló el

primer producto fotovoltaico para aplicaciones espaciales y tres años más tarde se lanzó el primer satélite alimentado parcialmente con energía solar^[14].

A partir de entonces, el mercado de las celdas solares ha experimentado un crecimiento constante como parte de la carrera tecnológica entre diversos países por obtener la primicia en el uso de estos dispositivos y sus múltiples ventajas, entre las que se encuentran: conversión de la luz en electricidad en un solo paso y en el mismo lugar de consumo, operación sin emisión de gases tóxicos o ruido, mantenimiento mínimo y vida útil entre 20 y 30 años^[15].

I.3.1 Efecto fotoeléctrico

La luz está compuesta por fotones, cuando éstos inciden sobre una celda solar éstos pueden ser reflejados, absorbidos o pueden pasar a través de la celda. Solo los fotones absorbidos generarán electricidad.

Una celda solar típica de silicio (ver Figura 2) se compone de dos partes unidas formando un sándwich. La parte superior de la celda es dopada de forma controlada con fósforo para darle un carácter negativo o tipo n. La parte posterior es dopada con boro para darle un carácter positivo o tipo p. Esta diferencia de cargas forma un campo eléctrico estático entre ambas capas, al cual le llaman unión. Entonces los fotones son absorbidos en la región de la unión liberando electrones en la celda, que a la vez superan el campo eléctrico,

para pasar a través de la celda. Estos electrones recorren un circuito externo produciendo así electricidad^[16].

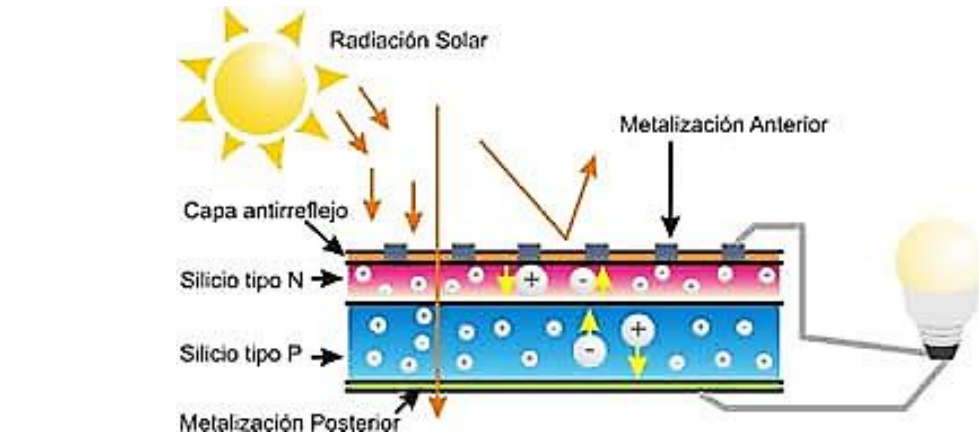


Figura 2. Efecto fotoeléctrico^[16].

I.3.2 Componentes básicos de una celda solar

Toda celda solar moderna consta usualmente de los siguientes componentes^[17]:

- Placa de vidrio: es aquella que permite ingresar la luz a la celda y a la vez protege a los semiconductores del ambiente.
- Capa antireflectiva: es aquella que está entre la placa de vidrio y el semiconductor, y tiene la función de minimizar la pérdida de luz por reflexión.

- Capa de semiconductor tipo n: es aquella que tiene una concentración de electrones excitados mayor a la de la capa tipo p, lo cual provoca que las cargas eléctricas de esta capa pasen a la capa tipo p, generando una diferencia de potencial con la otra capa.
- Sándwich de semiconductores tipo n y tipo p: es aquella en la que se encuentran colocados los semiconductores tipo n y tipo p, y están enlazados a través de un camino o vía que actúa como conductor por el cual circulan los electrones para ir del semiconductor tipo n al tipo p, generando un campo eléctrico en este medio.
- Capa de semiconductor tipo p: es aquella que tiene una deficiencia de electrones, lo cual atrae a los electrones excitados provenientes de la capa tipo n, provocando que se genere una diferencia de potencial entre ambas capas de semiconductor, mejor conocido como voltaje. En la Figura 3 se muestran los componentes descritos anteriormente.

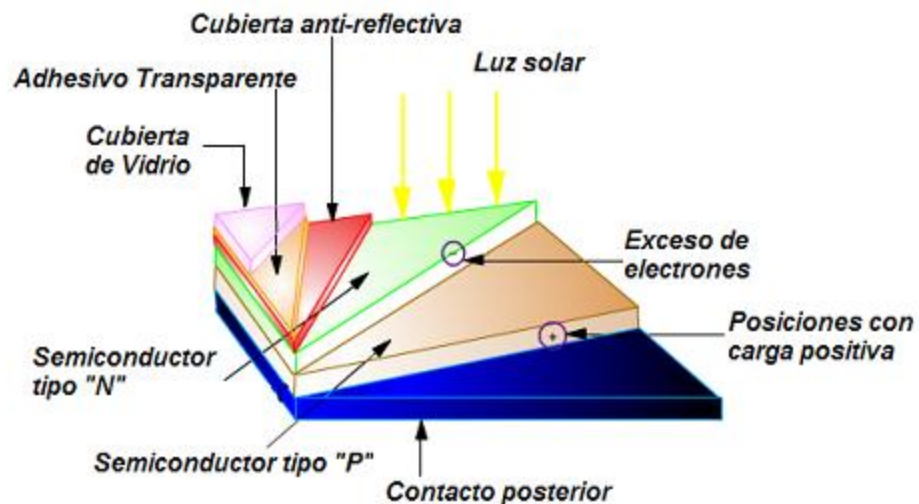


Figura 3. Diagrama típico de una celda solar^[17].

I.3.2.1 Semiconductores

Los semiconductores son materiales muy especiales que conducen mejor la electricidad que un aislante pero menos que un conductor. Sus propiedades eléctricas se encuentran entre las de los aislantes y las de los conductores, ya que la densidad de sus portadores de carga es intermedia entre dichos materiales, pues puede contener entre 10^{10} y 10^{13} electrones de conducción por cm^3 , mientras que los aislantes contienen aproximadamente 1 electrón de conducción por cm^3 y los conductores 10^{23} electrones de conducción por cm^3 . Además, la resistividad eléctrica de los semiconductores está entre 10^{-4} y $10^{10} \Omega\text{-cm}$, mientras que la resistividad de los metales varía entre 10^{-4} y $10^{-6} \Omega\text{-cm}^{[18]}$.

Estos materiales a bajas temperaturas se comportan como aislantes al aumentar su resistividad, pero a altas temperaturas su resistividad baja espectacularmente hasta acercarse a la de los metales. Al aumentar la temperatura, los átomos tendrán mayor energía térmica, es decir, vibrarán con mayor intensidad dentro del material, ocasionando que algunos electrones no soporten estas vibraciones y se separen de los átomos a los que normalmente están ligados. La cantidad de electrones que se liberan por efecto térmico es pequeña, pero suficiente para que se empiece a observar una corriente al aplicar algún voltaje en el material^[19].

Para estos materiales el carácter de la relación de la temperatura con la resistividad (ρ) y la conductancia (σ) está expresada de la siguiente manera:

$$\rho = \rho_0 e^{\beta/T} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\beta/T} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde ρ_0 , σ_0 y β son constantes positivas y T es la temperatura en Kelvin.

La teoría de bandas explica que los materiales sólidos presentan una gran cantidad de átomos, formando un número elevado de nuevos niveles de energía, los cuales constituyen una región llamada banda de energía. Los semiconductores presentan una banda de energía prohibida, la cual se encuentra entre una banda permitida o banda de valencia y una banda de conducción, como se muestra en la Figura 4^[20].

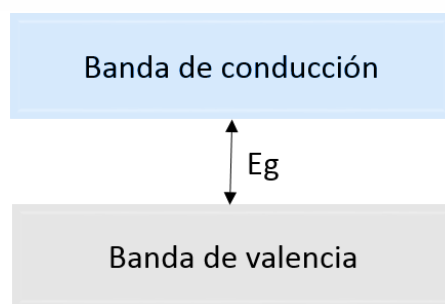


Figura 4. Diagrama de bandas en un semiconductor^[20].

La banda prohibida es aquella energía mínima necesaria para hacer pasar un electrón de una banda a la otra. La banda de conducción es la mínima energía que puede tener un electrón libre y la banda de valencia es la energía máxima de los electrones en un enlace completo. Además, en un semiconductor se presentan electrones libres y huecos libres, conocido como modelo del par hueco-electrón, es decir, cuando un enlace covalente se rompe y un electrón se libera, queda un hueco en el lugar correspondiente, y éste también podrá moverse en el sentido contrario al movimiento del electrón (ver Figura 5)^[21].

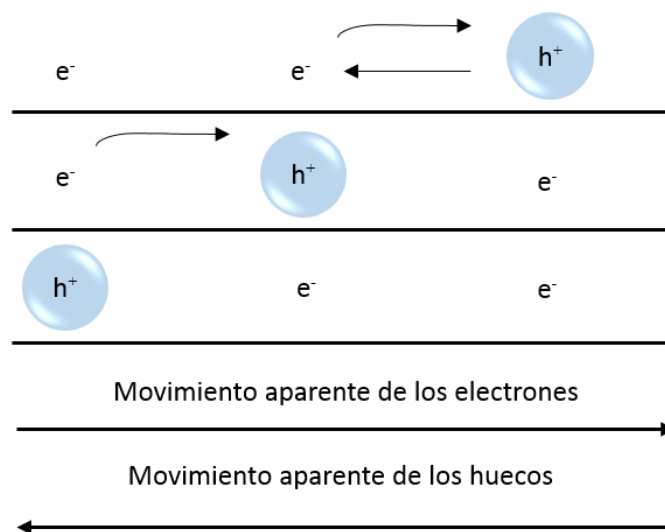


Figura 5. Representación del modelo del par hueco-electrón^[21].

Cuando se le proporciona energía del orden del valor de la banda de energía prohibida (E_g) a un electrón de la banda de valencia, éste pasa a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. Si no se proporciona a los electrones de valencia una energía mayor o igual al E_g , no se

podrán generar pares de electrones y huecos libres. Existe por lo tanto, una longitud de onda crítica por debajo de la cual la energía de los fotones no alcanza a producir excitación de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. En los semiconductores a temperaturas de 0 K todos los electrones se encuentran en la banda de valencia y por esta razón no hay conductividad. Las energías involucradas en estos procesos deben de estar en unidades de electrón-volt (eV, siendo 1 eV la energía que gana un electrón al caer a través de una diferencia de potencial de 1 volt, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)^[22].

La radiación proveniente del Sol tiene una distribución espectral como se muestra en la Figura 6.

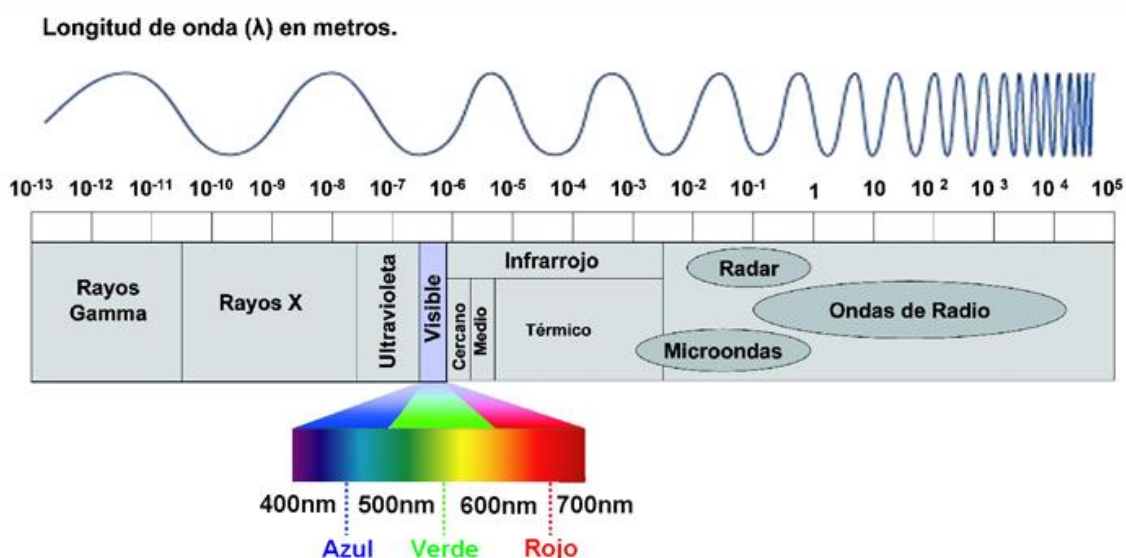


Figura 6. Espectro electromagnético^[22].

La energía de los fotones que componen la luz (E) y la longitud de onda de la luz (λ) están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$E = hc/\lambda$$

Ecuación (3)

Donde h es la constante de Planck (6.6×10^{-34} J-s) y c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s)^[23].

Los fotones más energéticos corresponden a las longitudes de onda menores (ultravioleta) y los menos energéticos a las longitudes de onda mayores (visible e infrarrojo).

I.3.2.2 Clasificación de los semiconductores

Los semiconductores, de acuerdo a su pureza, se clasifican en intrínsecos y extrínsecos.

Se dice que un semiconductor es intrínseco cuando se encuentra en estado puro, es decir, que no contiene ninguna impureza, ni átomos de otro tipo dentro de su estructura. En este caso, la cantidad de huecos que dejan los electrones en la banda de valencia al atravesar la banda prohibida será igual a la cantidad de electrones libres que se encuentran presentes en la banda de conducción^[24].

Los semiconductores extrínsecos se forman añadiendo pequeñas impurezas a los semiconductores puros. El objetivo es modificar su comportamiento eléctrico al alterar la densidad de portadores de cargas libres.

Estas impurezas se llaman dopantes. Así, podemos hablar de semiconductores dopados. En función del tipo de dopante obtendremos semiconductores dopados tipo p o tipo n. En los semiconductores tipo n los electrones son los portadores mayoritarios y en los semiconductores tipo p los huecos son los portadores mayoritarios^[25].

I.3.3 Funcionamiento de una celda solar

El siguiente es el proceso básico, repetido millones de veces, que permite a una celda solar generar energía eléctrica^[26]:

1. Los fotones inciden en la superficie de la celda, usualmente de vidrio, y este permite pasar la luz a la capa del semiconductor tipo n.
2. Los átomos en la capa del semiconductor tipo n se excitan liberando electrones, lo que genera un exceso de electrones en la misma.
3. La capa de semiconductor tipo p tiene una deficiencia de electrones, lo cual atrae a los electrones excitados provenientes de la capa tipo n. En términos eléctricos, se genera una diferencia de potencial entre ambas capas de semiconductor, mejor conocido como voltaje.

4. Los electrones viajan del semiconductor tipo n al p a través del punto de unión entre ambos. Esto genera un campo eléctrico en la unión, y esta es la corriente eléctrica que se aprovecha de la celda.

I.3.4 Características de las celdas solares

A continuación se enumeran las características más importantes que se evalúan en una celda solar^[27]:

- Corriente a cortocircuito (I_{sc}): Es la máxima corriente generada por la celda solar y se mide cuando se conecta un circuito exterior a la celda con resistencia nula.
- Voltaje a circuito abierto (V_{oc}): Es el voltaje que se mide cuando no pasa corriente a través de la celda solar, es decir, sin carga conectada en la salida.
- Potencia máxima (P_{max}): Es la máxima energía entregada por una celda solar cuando pasa por un valor máximo de corriente y voltaje, como se describe en la Ecuación 4, donde I_{max} es la corriente máxima y V_{max} corresponde al voltaje máximo. Su unidad de medición es el Watt.

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \qquad \text{Ecuación (4)}$$

- Eficiencia de la celda solar (η): es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por una celda solar. Este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima, P_{max} , dividido entre la luz que llega a la celda, irradiancia (E , en W/m^2), bajo condiciones estándar (STC) y el área superficial de la celda (A_c en m^2), ver Ecuación 5. La STC especifica una temperatura de 25 °C y una irradiancia de 1000 W/m^2 con una masa de aire espectral de 1.5 (AM 1.5). Esto corresponde a la irradiación y espectro de la luz solar incidente en un día claro sobre una superficie solar inclinada con respecto al sol con un ángulo de 41.81° sobre la horizontal. Esta condición representa aproximadamente, la posición del Sol a mediodía.

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \times A_c} \quad \text{Ecuación (5)}$$

- Factor de llenado (FF): este término sirve también para definir la eficiencia de una celda solar y se define como la relación entre el punto máximo de potencia dividido entre el voltaje a circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}):

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{\eta \times A_c \times E}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Estos parámetros se pueden obtener de una curva de corriente potencial (I-V) derivada de la caracterización eléctrica de una celda solar (ver Figura 7).

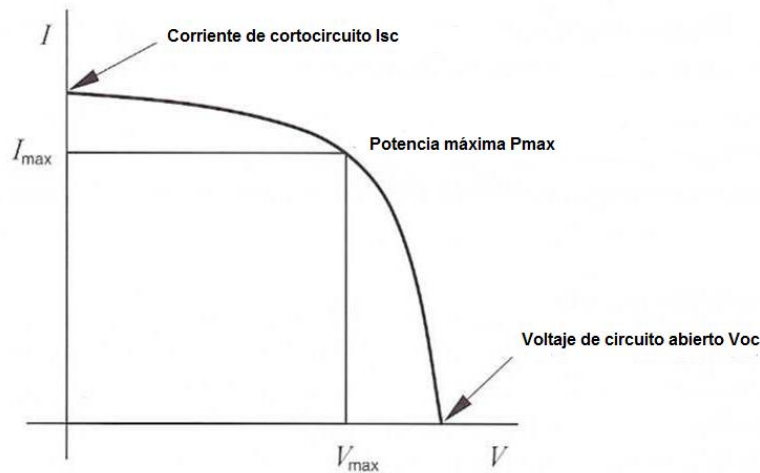


Figura 7. Curva I-V característica de una celda solar^[27].

I.4 Clasificación de las celdas solares

Las celdas solares se clasifican en tres generaciones que indican el orden de importancia y relevancia que han tenido históricamente. A continuación se describen las características de cada una.

I.4.1 Celdas solares de primera generación

En la actualidad existen varios tipos de tecnologías para la generación fotovoltaica de electricidad, la primera de estas es la denominada tecnología de silicio mono y policristalino, también conocida como de primera generación. El mercado mundial de las celdas solares está dominado por esta tecnología. Una celda solar comercial de silicio transforma en electricidad el 15% de la luz que incide sobre ella, su costo de fabricación es alto debido a que se requiere alta

pureza en los materiales de partida. Este tipo de celdas presentan gran superficie y alta calidad, sin embargo, no existen alternativas para la reducción de su costo de fabricación^[28].

I.4.2 Celdas solares de segunda generación

Los materiales destinados a la construcción de celdas solares de segunda generación han sido desarrollados para satisfacer las necesidades de suministro de energía y el mantenimiento de los costos de producción de las celdas solares. Las técnicas de fabricación alternativas, tales como la deposición química de vapor y la galvanoplastia, presentan más ventajas, ya que reducen la temperatura del proceso de forma significativa^[29].

Uno de los materiales con más éxito en la segunda generación han sido las películas finas de telurio de cadmio (CdTe), de silicio amorfo y microamorfo^[30]. Estos materiales se aplican en una película fina sobre un sustrato tal como vidrio. La reducción del material que se requiere para construir la celda, y por lo tanto de los costos, es significativa.

Estas tecnologías prometen mejorar las eficiencias de conversión, en particular, el CdTe, ya que ofrece costos de producción más baratos. Estas tecnologías pueden tener eficiencias de conversión más altas combinadas con costos de producción más baratos.

Entre los fabricantes de celdas solares existe una tendencia hacia las tecnologías de segunda generación, pero la comercialización de estas tecnologías ha sido difícil. En el 2007 la producción de celdas solares a partir de CdTe representó el 4.7% del mercado y las celdas fabricadas de silicio en capa delgada el 5.2%^[31].

I.4.3 Celdas solares de tercera generación

La tercera generación de celdas solares tiene como meta la obtención de altos rendimientos con bajos costos de fabricación, además de reducir las principales pérdidas energéticas en una celda solar, que están dadas por la incapacidad de absorber fotones con energía menor que la de la banda de energía prohibida y la termalización (exceso de calor) de la energía del fotón que excede dicho salto energético. Dentro de esta categoría destacan las celdas solares tipo tándem o multicapa, con las cuales se han alcanzado rendimientos de hasta 36%^[32], sin embargo, su fabricación a nivel industrial sigue siendo costosa. Los dispositivos existentes más eficientes han alcanzado hasta un 43% de eficiencia, este tipo de celdas solares combinan varios mecanismos a lo largo de la misma para obtener alta eficiencia^[33].

I.5 Celda solar sensibilizada con colorante

Otra variante es la celda solar sensibilizada con colorante, desarrollada por el Profesor Grätzel en 1991, reportando una eficiencia de 7.1 a 7.9%^[34].

Este tipo de celda emplea un electrolito líquido u otra fase conductora de iones como medio de transporte de carga. En su más simple configuración (ver Figura 8) la celda consta de un electrodo negativo fabricado a partir de vidrio conductor (vidrio con una capa de SnO_2 dopado con In) revestido con una película porosa de nanocristales de TiO_2 , a ésta se encuentran unidas moléculas del colorante, un electrolito que contiene el par óxido-reducción y el contra electrodo fabricado con un vidrio conductor revestido de un catalizador. Al iluminar la celda se produce voltaje entre sus electrodos y corriente a través de un contacto externo.

La absorción de luz en la celda ocurre por las moléculas de colorante y la separación de cargas por la inyección de electrones de la tinta hacia el TiO_2 en la interfase del electrolito semiconductor. El electrodo nanoporoso de TiO_2 (con un grosor de 10 μm y tamaño de partícula promedio en el orden de 20 nm) tiene la función de incrementar el área superficial interna del electrodo y así permitir que una gran cantidad de moléculas de colorante estén en contacto con el semiconductor y el electrolito, ya que solamente las moléculas de colorante que estén en contacto directo con el semiconductor podrán separar cargas^[35]. Una

propiedad característica del TiO_2 es que tiene una energía banda prohibida de $3.15 \text{ eV}^{[36]}$, por lo cual absorbe radiación solo debajo de 400 nm , permitiendo que la mayor parte de espectro solar esté disponible para ser absorbido por las moléculas de colorante.

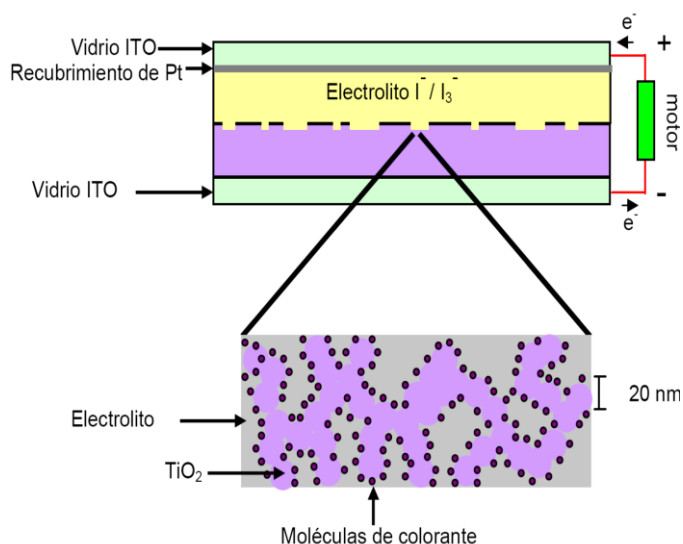


Figura 8. Esquema de una celda solar nanocristalina tipo Grätzel^[35].

La principal limitación de estas celdas está dada por el colorante empleado, ya que existe un número reducido de colorantes que presentan buena estabilidad y permiten obtener altos rendimientos cuánticos^[37]. Sin embargo, representa un dispositivo generador de energía a muy bajo costo.

I.6 Celda solar sensibilizada con puntos cuánticos

Una alternativa es el uso de estructuras cristalinas semiconductoras a nanoescala capaces de transformar la luz, comúnmente denominados puntos cuánticos (QD's por sus siglas en inglés)^[38]. Recientemente diversos grupos de

investigación han usado puntos cuánticos de calcogenuros (semiconductores inorgánicos) como sensibilizadores de estructuras de TiO_2 nanoporosas, entre los que destacan $\text{CdS}^{[39]}$, $\text{CdSe}^{[40]}$, $\text{InP}^{[41]}$, $\text{InAs}^{[42]}$, $\text{PbS}^{[43]}$ y $\text{Bi}_2\text{S}_3^{[44]}$, principalmente.

Una de las propiedades más interesantes de los puntos cuánticos es que pueden ser diseñados para absorber de manera específica en el espectro de ultravioleta visible. En la Figura 9 se presenta un diagrama esquemático de la sensibilización esperada de puntos cuánticos (de tamaño de 3 a 5 nm) del semiconductor InP impregnado sobre nanopartículas de 30 nm de TiO_2 . En la Figura 10 se presenta un diagrama esquemático del modelo de bandas de la interacción interfacial entre el semiconductor TiO_2 y el semiconductor cuántico que en este caso es el InP . El resto del circuito en principio funciona de manera similar al de una celda tipo Grätzel con un electrolito redox I^-/I_3^- .

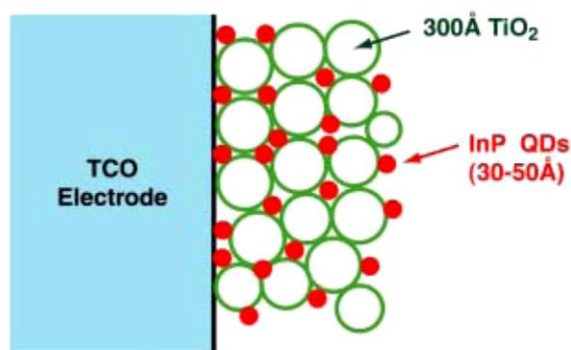


Figura 9. Sensibilización esperada de puntos cuánticos del semiconductor InP impregnado sobre nanopartículas de $\text{TiO}_2^{[41]}$.

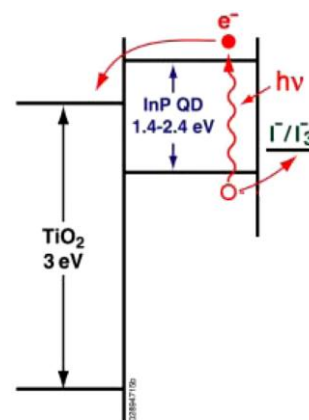


Figura 10. Modelo de bandas de la interacción interfacial entre el semiconductor TiO_2 y el semiconductor cuántico $\text{InP}^{[41]}$.

I.7 Celda solar de capa extremadamente delgada

Una celda solar de capa extremadamente delgada, ETA por su nombre en inglés (*extremely thin absorber*), es un dispositivo fotovoltaico de 2 a 10 μm en espesor compuesto de un material inorgánico absorbente ($1.1 < E_g < 2.5 \text{ eV}$) extremadamente delgado ($< 300 \text{ nm}$) que forma una unión heterogénea interpenetrante entre un semiconductor transparente ($E_g > 3 \text{ eV}$) tipo n (TiO_2 o ZnO) y un semiconductor transparente tipo p (CuSCN) con un contacto metálico posterior^[45]. Las bases físicas del funcionamiento de la celda solar ETA son la absorción de la luz y el principio de la unión p-i-n, como se observa en la Figura 11(a).

Como se puede inferir del diagrama en la Figura 11(b), en la interfaz del semiconductor tipo n y la capa absorbente el campo de unión y el arreglo de bandas es tal que la transferencia de electrones puede ocurrir únicamente de la capa absorbente hacia el semiconductor tipo n, mientras que la transferencia de huecos puede ocurrir sólo de la capa absorbente al semiconductor tipo p.

La celda solar de capa extremadamente delgada (ETA) combina la ventaja de usar capas delgadas de material absorbente fácil y barato de producir sobre sustratos nanoestructurados con la estabilidad característica de las celdas solares de estado sólido^[46].

La combinación de estos conceptos, un sustrato nanoestructurado recubierto con una capa extremadamente delgada de material inorgánico absorbente y terminada con un colector de huecos de estado sólido es lo que se conoce como una celda solar ETA^[47].

Generalmente, el semiconductor tipo n es depositado sobre un vidrio transparente con una capa de óxido conductor transparente (TCO por sus siglas en inglés) y una delgada capa metálica (oro) sirve como contacto eléctrico al semiconductor tipo p (ver Figura 11).

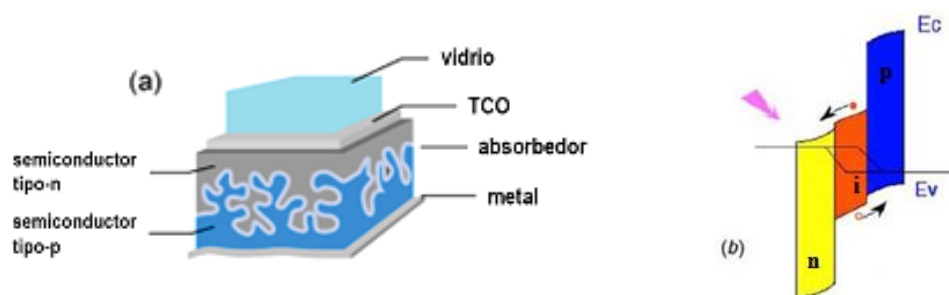


Figura 11. (a) Representación y (b) Diagrama de bandas idealizado para una celda solar ETA^[45].

Uno de los objetivos que persigue este diseño es obtener una superficie y área efectiva mayor en la capa del semiconductor tipo n para permitir la deposición directa del material de absorción, el cual tendrá espesores reducidos, lo cual permitirá una mejora en la probabilidad de colección de cargas y reducirá su trayectoria de transporte en la capa absorbente, limitando la probabilidad de recombinación electrón-hueco dentro de la misma.

Al mismo tiempo, la dispersión en las superficies rugosas de la estructura incrementará la trayectoria óptica de la luz a través de la muestra, es decir, la luz rebotará muchas veces dentro de la misma favoreciendo la absorción de los fotones. Este fenómeno es conocido como retención de la luz (light trapping)^[48].

Para obtener un buen efecto de dispersión de la luz en una celda solar, el material usado como capa ventana (aquel que dejará pasar toda la radiación solar a través de la celda, típicamente materiales con $E_g > 3 \text{ eV}$) debe tener una estructura rugosa en el rango de 50 a 300 nm. Con estas condiciones, las propiedades ópticas y electrónicas de la heteroestructura son favorables para aplicaciones fotovoltaicas.

Los materiales más utilizados como capa ventana y semiconductor tipo n en celdas solares ETA son el TiO_2 y el ZnO ^[49]. Como semiconductor tipo p, o colector de huecos, se han utilizado principalmente CuSCN ($E_g = 3.60 \text{ eV}$)^[50] y ZnTe ^[51]. Como capa absorbente se han utilizado semiconductores como CdTe ^[52] y CuInS_2 ^[50].

Las propiedades únicas de transporte de carga y las bajas velocidades de recombinación observadas en el TiO_2 hacen de este material el más utilizado como semiconductor tipo n y transportador de electrones en celdas solares ETA. Este material también ha sido utilizado ampliamente en fotocátalisis y

celdas solares sensibilizadas con colorante, conduciendo a eficiencias mayores que la mayoría de otros semiconductores, tales como ZnO y SnO₂.

En la construcción de celdas solares ETA, el uso de películas delgadas de TiO₂ con estructura rugosa resulta favorable, debido a que favorece la dispersión de la luz dentro de la celda, tal como se explicó anteriormente. La mayoría de las películas delgadas de TiO₂ han sido preparadas por técnicas de química suave o sol gel, tales como spin coating^[53] y dip coating^[54], las cuales comprenden la deposición in situ de capas delgadas de TiO₂ con estructura nanocrystalina por el proceso de hidrólisis y condensación de una solución del precursor (sales metálicas o alcóxidos) sobre el sustrato, seguido de un tratamiento térmico. Esto conduce a la obtención de películas delgadas con estructura nanocrystalina densa o macroporos^[55], con porosidad limitada para su aplicación en celdas solares. La adición de copolímeros de bloque en la solución del precursor es una estrategia alternativa para mejorar la mesoporosidad, conduciendo a la obtención de mesoporos ordenados en la película para incrementar el área superficial^[56]. Las técnicas que hacen uso de estos polímeros, son screen printing^[57] y doctor blade^[58]. Estas técnicas utilizan una pasta viscosa preparada a partir de partículas de TiO₂ pre-sintetizado dispersas en un medio que también contiene el polímero. La preparación de películas de TiO₂ por estas técnicas ha sido llevada a gran escala debido a su bajo costo, sencillez y reproducibilidad.

La revisión de la literatura muestra que ha habido un esfuerzo creciente para obtener depósitos uniformes del material absorbente sobre el sustrato nanoestructurado del semiconductor tipo n por diferentes técnicas. Por ejemplo, se prepararon capas delgadas de CdTe por deposición electroquímica^[59] y por fase de vapor epitaxial (VPE)^[60]. El CuInS₂ ha sido depositado por el método de capa de iones de gas de reacción^[50]. El CdS y el CdTe han sido depositados por el método silar (*successive ionic layer adsorption and reaction*) como capas absorbentes para ser utilizadas en celdas solares ETA^[61]. El método silar es un procedimiento efectivo para el depósito de películas delgadas y uniformes, el cual consiste en la inmersión del sustrato de manera secuencial en dos soluciones separadas, una solución aniónica y otra catiónica con una etapa intermedia de enjuague. En la actualidad, es uno de los métodos más novedosos para la preparación de películas delgadas debido a que permite el crecimiento controlado y uniforme de las mismas.

A continuación, en la sección de antecedentes, se presenta una revisión de las investigaciones más recientes que se han realizado en el desarrollo de películas delgadas para su uso como capas absorbentes en celdas solares ETA.

I.8 Antecedentes

En 1996, Könenkamp *et al.*^[62] propuso el concepto de absorción de una capa extremadamente delgada de $n\text{-TiO}_2/\text{PbS}$, su trabajo incrementó considerablemente el interés por esta tecnología cuando reportó celdas solares de unión heterogénea totalmente inorgánicas^[63]. Asimismo, en 1998 Tennakone *et al.*^[64] reportó la celda solar ETA con $n\text{-TiO}_2/\text{Se}/p\text{-CuSCN}$ donde el selenio fue utilizado como sensibilizador para el $n\text{-TiO}_2$ y el $p\text{-CuSCN}$ se empleó como un transportador de huecos, reportando una eficiencia de conversión del 0.13%.

En el 2001, Könenkamp *et al.*^[50] estudió el efecto del espesor de la capa absorbente en la configuración $n\text{-TiO}_2/\text{CuInS}_2/p\text{-CuSCN}$, y después presentó la primera explicación razonable para modelar el comportamiento de la celda ETA TiO_2/CdTe , usando capas absorbentes de 250 nm^[52]. En la Tabla 1 se presenta un resumen cronológico de las investigaciones más relevantes (después de Könenkamp) dentro de la investigación de celdas solares ETA.

Tabla I. Resumen cronológico de las investigaciones más relevantes de celdas solares de capa de absorción extremadamente delgada.

Capa n	Capa absorbente	Capa p	Eficiencia	Investigador	Referencia	Año
ZnO	CdTe	CuSCN	-	Lévy-Clément	65	2005-6
ZnO	CdSe	CuSCN	1.5-2.3		66	
TiO ₂	In(OH) _x S _y /PbS	PEDOT:PSS	1	Dittrich	67	
TiO ₂	CdS	CuSCN	1.3	Larramona	68	
TiO ₂	PbS	PEDOT:PSS	0.1	Krebs	69	
TiO ₂	MS _x H _y (M = In, Cu, Pb)	PEDOT:PSS	-	Dittrich	70	2008-9
ZnO	In ₂ S ₃	CuSCN	2.5-3.4		71	
TiO ₂	In ₂ S ₃	CuSCN	2.3		72	
TiO ₂	In ₂ S ₃ /In _x Pb _{1-x} S	CuSCN	2.9	Gavrilov	73	2009
TiO ₂	In _x (OH) _y S _z /Sb ₂ S ₃	CuSCN	3.37	Hodes	74	
TiO ₂	In(OH) _x S _y /Cu _{2-x} S	LiSCN/CuSCN	0.06		75	
ZnO	ZnS/CdS	CuSCN	0.37		76	
TiO ₂	Sb ₂ S ₃	LiSCN/CuSCN	3.7	Larramona	77	
ZnO	In ₂ S ₃	CuInS ₂	4.17	Krunk	78	2010
ZnO-SnO ₂	In ₂ S ₃ /PbS	PEDOT:PSS	0.68	Wijayantha	79	
TiO ₂	Sb ₂ S ₃	MeOTAD	3.1	Hodes	80	
ZnO	CdSe	CuSCN	-	Bisquert	81	2011

En base al estado del arte, es evidente que existe una amplia gama de variantes por ser investigadas.

Un calcogenuro de gran interés es el Sb₂S₃, el cual tiene una gran variedad de aplicaciones en aparatos optoelectrónicos. El Sb₂S₃ es un material altamente anisotrópico con estructura de capas que cristaliza en una fase puramente ortorrómbica (grupo espacial *pbnm*) y posee una estructura

polimérica tipo listón en la cual capas de SbS_3 y SSb_3 forman pirámides interconectadas, lo que explica la anisotropía y su tendencia a formar barras a nivel nanométrico^[82].

De acuerdo a su energía de banda prohibida (1.6 a 1.8 eV)^[83], este compuesto absorbe en un amplio intervalo de longitudes de onda del espectro solar, incluido el visible y el infrarrojo cercano, lo cual lo convierte en un potencial material absorbente para su uso en celdas solares. Recientemente se reportó la síntesis de nanobarras de Sb_2S_3 por un método de síntesis verde asistida por ultrasonido y usando líquido iónico^[84], lo que hace a este compuesto un material accesible y de bajo costo de manufactura.

Otro de los materiales de interés para ser utilizado como capa absorbente en celdas solares es el In_2S_3 . El sulfuro de indio (In_2S_3) es un sólido cristalino de estructura tetragonal^[85] que posee gran importancia en aplicaciones fotovoltaicas y optoelectrónicas debido a su estabilidad, su energía de banda prohibida (2.1 eV)^[86] y su comportamiento fotoconductor^[87]. Se ha usado como sustituto efectivo del CdS en celdas solares del tipo $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$, ya que no sólo elimina el uso del cadmio, cuya toxicidad es alta, sino que también mejora la transmisión de la luz en la región del azul, debido a que posee una energía de banda prohibida mayor a la del CdS.

En vista de las características absorbentes de estos materiales, y a que solo han sido estudiados como capa absorbente en celdas solares de forma

independiente, en este trabajo se planteó desarrollar una celda solar de capa extremadamente delgada que emplea como material de absorción capas mixtas del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$, con el objetivo de aprovechar la capacidad de absorción del Sb_2S_3 hacia el rojo, y del In_2S_3 hacia el azul para maximizar el proceso de absorción de la luz en la celda solar. La celda utiliza además una capa densa de TiO_2 como base, una capa mesoporosa de TiO_2 como colector de electrones, una capa de CuSCN como colector de huecos y una capa de Au como contacto eléctrico. Como sustrato para la construcción de la celda se utiliza el vidrio conductor transparente ITO (óxido de estaño dopado con indio, $\text{SnO}_2\text{:In}$). En la Figura 12 se representa la estructura y el diagrama de bandas esperado de la celda solar ETA propuesta en este trabajo.

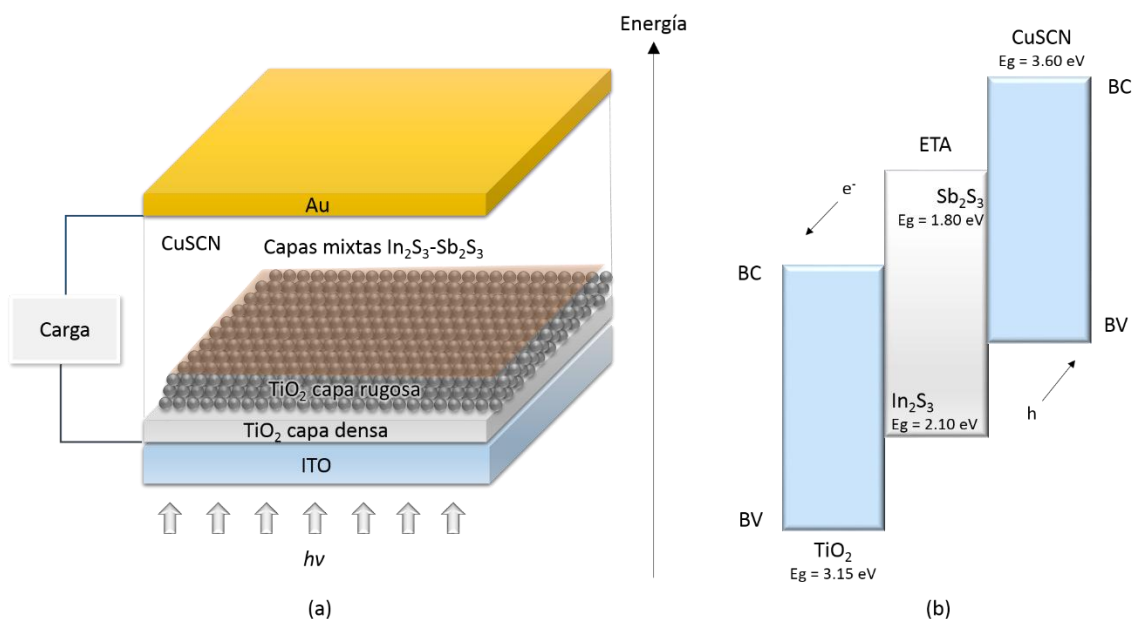


Figura 12. (a) Estructura y (b) diagrama de bandas esperado para la celda solar ETA propuesta en este trabajo.

I.9 Justificación

Los sulfuros de indio y antimonio han mostrado buen comportamiento al emplearse como materiales de absorción en celdas solares ETA, sin embargo, sólo han sido estudiados de forma independiente, es por esto que en este trabajo se propone desarrollar una celda solar ETA que emplee como material de absorción capas mixtas del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ con el propósito de aprovechar la capacidad de absorción de los dos sistemas. Esta celda utiliza, además, una capa mesoporosa de TiO_2 como colector de electrones y una capa de CuSCN como colector de huecos.

I.10 Hipótesis

Es posible la preparación de capas delgadas mixtas del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ y la construcción de una celda solar de arquitectura de capa extremadamente delgada que emplee este sistema como material de absorción.

I.11 Objetivos

I.11.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de una celda solar de capa extremadamente delgada que emplea como material de absorción el sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$.

I.11.2 Objetivos específicos

1. Preparar una precapa de TiO_2 por la técnica spin coating y caracterizarla mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), Microscopia de Fuerza Atómica (AFM), Espectroscopia de Ultravioleta Visible (UV-Vis) y Difracción de Rayos X (DRX).
2. Preparar una segunda capa de TiO_2 por la técnica screen printing y caracterizarla mediante Microscopia Electrónica de Barrido, Microscopia de Fuerza Atómica, Espectroscopia de Ultravioleta Visible y Difracción de Rayos X.
3. Depositar capas mixtas del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ mediante el método silar

y evaluar el efecto del número de ciclos y las condiciones de depósito de la capa absorbente, además de su caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido, Microscopia de Fuerza Atómica, Espectroscopia de Ultravioleta Visible y Difracción de Rayos X.

4. Depositar una capa de CuSCN por el método de impregnación y caracterizarla por Microscopia Electrónica de Barrido, Microscopia de Fuerza Atómica, Espectroscopia de Ultravioleta Visible y Difracción de Rayos X.
5. Construir una celda solar ETA empleando como material de absorción capas mixtas del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$, una capa mesoporosa de TiO_2 como colector de electrones y una capa de CuSCN como colector de huecos.
6. Evaluar la eficiencia de la celda solar ETA mediante la curva de corriente potencial (I-V).
7. Elaborar una tesis de grado Maestría.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología experimental de esta investigación se puede resumir en cuatro etapas:

- Etapa 1: Selección de los materiales para la construcción de la celda solar ETA.
- Etapa 2: Selección de los métodos de preparación.
- Etapa 3: Preparación de los materiales y construcción de la celda solar ETA.
- Etapa 4: Caracterización de los materiales y de la celda solar ETA.

En las secciones siguientes se describen a detalle los materiales y métodos involucrados en cada etapa.

II.1 Etapa 1: Selección de los materiales para la construcción de la celda solar ETA

- Semiconductor tipo n: TiO_2

La energía de banda prohibida del TiO_2 ($E_g = 3.15 \text{ eV}$), junto a las propiedades de transporte de carga y a la baja velocidad de recombinación que presenta, así como su versatilidad para ser depositado por varias técnicas, hacen de este material el candidato ideal para ser utilizado como semiconductor tipo n.

- Capa absorbente: In_2S_3 - Sb_2S_3 en capas mixtas

Dado que las energías de banda prohibida del In_2S_3 ($E_g = 2.10 \text{ eV}$) y del Sb_2S_3 ($E_g = 1.80 \text{ eV}$) se encuentran dentro del rango ideal de energía de banda prohibida para un material absorbente ($1.1 \text{ eV} - 2.5 \text{ eV}$), a sus altos coeficientes de absorción, a la disponibilidad de estos materiales, y a la facilidad de los métodos usados para su preparación, se seleccionaron estos materiales para su utilización como capa absorbente.

- Semiconductor tipo p: CuSCN

Debido a la amplia energía de banda prohibida que presenta el CuSCN (3.60 eV), su alta estabilidad química, a su capacidad de conducir huecos, así como a la disponibilidad de este material y la sencillez de las

técnicas utilizadas para su deposición, este material se utilizó como semiconductor tipo p (ver Apéndice A para una descripción completa de las propiedades de cada material utilizado en la construcción de la celda solar).

II.2 Etapa 2: Selección de los métodos de preparación

De acuerdo a las características deseadas en cada material se seleccionó su método de preparación. En esta sección se describen los principios generales de los métodos seleccionados y las ventajas que se obtienen del uso de los mismos.

II.2.1 Selección del método de preparación de la capa de semiconductor tipo n

Se depositaron dos capas del semiconductor tipo n (TiO_2):

- La primera capa consiste en una capa delgada, continua y densa de TiO_2 que tiene la función de evitar cualquier contacto entre el sustrato y la capa de semiconductor tipo p (CuSCN) para impedir que ocurra corto circuito en la celda, así como mejorar la adherencia de la segunda capa de TiO_2 con el sustrato. Para la obtención de una película delgada y densa de TiO_2 se utilizó el método de spin coating.

- La segunda capa consiste en una capa rugosa y nanoestructurada de TiO_2 , la cual actúa como capa ventana y transportador de electrones. Además, sirve como soporte para el depósito de la capa absorbente. Para la obtención de una capa rugosa de TiO_2 se utilizó el método de screen printing.

II.2.1.1 Selección del método de preparación de la capa densa de semiconductor tipo n

Para la preparación de una capa densa de TiO_2 se seleccionó el método de spin coating o depósito por giro ultra rápido. Esta técnica consiste en depositar un exceso de la solución del precursor (sales metálicas o alcóxidos) del material a depositar sobre el sustrato, posteriormente, éste se hace girar a altas velocidades para lograr la distribución uniforme del material sobre el mismo, gracias a la acción de la fuerza centrífuga^[88]. En la Figura 13 se ilustra este proceso, el cual puede describirse en cuatro pasos:

1. Se coloca sobre el sustrato un exceso de la solución del precursor del material a depositar.
2. Se inicia el giro para que se lleve a cabo la distribución uniforme del material sobre el sustrato. El aparato gira por un tiempo y velocidad determinada, dependiendo de la densidad del material empleado y el espesor deseado de la película.

3. Se detiene el giro.
4. Se deja evaporar la película antes de retirar el sustrato.

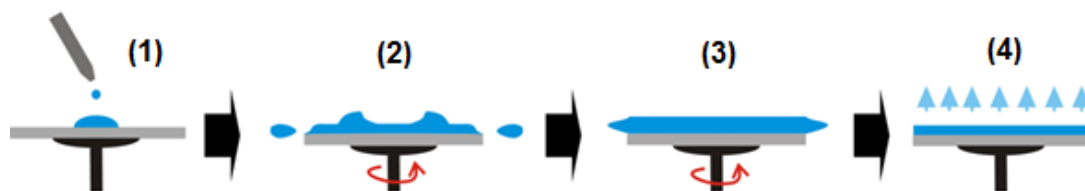


Figura 13. Depósito de películas delgadas por el método spin coating^[88].

Finalmente se realiza un tratamiento térmico a la película, dependiendo de las propiedades deseadas.

Una de las principales ventajas de este método es que permite preparar películas delgadas y densas de una gran variedad de materiales mediante un proceso sencillo, rápido y de bajo costo, es por ello que se seleccionó este método para la preparación de la primera capa de TiO_2 .

Entre las limitaciones de este método se encuentran el uso ineficiente del material a depositar y el tamaño del sustrato que puede utilizarse.

II.2.1.2 Selección del método de preparación de la capa rugosa de semiconductor tipo n

Para la preparación de una capa rugosa de TiO_2 se seleccionó el método de screen printing o serigrafía. Esta técnica emplea una malla de apertura seleccionada por el usuario, a través de la cual se hace pasar una pasta que contiene el material a depositar. La malla contiene zonas obstruidas por una tinta especial, asimismo, contiene zonas donde la malla se encuentra libre para que la pasta pase y pueda efectuarse el depósito de acuerdo al diseño deseado^[89]. Este proceso se ilustra en la Figura 14.

Una vez aplicada la pasta, ésta debe dejarse secar. Enseguida se aplica un tratamiento térmico a la película dependiendo de las propiedades deseadas.

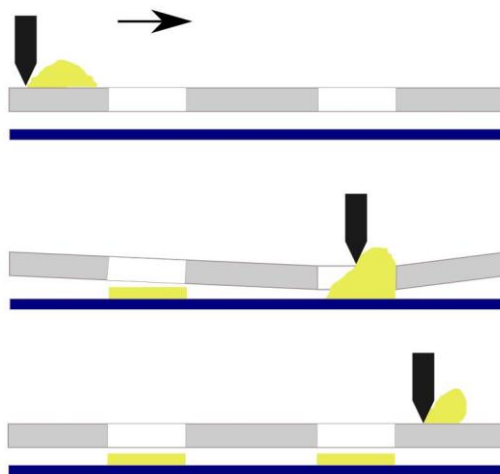


Figura 14. Depósito de películas por el método screen printing^[89].

Entre las ventajas de esta técnica encontramos que es un proceso de fabricación muy sencillo, rápido, de bajo costo y da como resultado películas con propiedades altamente reproducibles y de gran área superficial, es por ello que se seleccionó este método para la preparación de una capa rugosa nanoestructurada de TiO_2 .

Entre las limitaciones de este método se encuentra que debe tenerse un buen control de la composición de la pasta, esto con el fin de obtener una viscosidad adecuada, ya que no se puede preparar películas a partir de pastas de viscosidad muy baja o demasiado alta.

II.2.2 Selección del método de preparación de la capa absorbente

Para la preparación de la capa absorbente se seleccionó el método silar. Este método se encuentra en la categoría de métodos químicos de depósito y se le nombra así por sus siglas en inglés, *successive ionic layer adsorption and reaction*.

En este método el sustrato es sumergido en dos soluciones distintas, una que contiene cationes que se absorberán sobre la superficie del sustrato y otra solución que contiene aniones que reaccionarán con los cationes adsorbidos para generar un precipitado en la superficie del sustrato.

El mecanismo de la reacción se puede resumir en cuatro pasos^[90] (ver Figura 15):

1. Adsorción: se coloca el sustrato en una solución iónica donde los cationes se adhieren a la superficie del sustrato, los aniones de la solución forman una capa secundaria sobre los cationes.
2. Enjuague: se remueve el sustrato de la solución y se enjuaga con agua desionizada para remover el exceso de cationes y aniones que no estén adheridos a la superficie del sustrato.
3. Reacción: se coloca el sustrato en otra solución iónica, los aniones en esta solución reaccionan con los cationes de la solución anterior para formar un precipitado sólido.
4. Enjuague: se remueve el sustrato de la solución y se enjuaga de nuevo para remover los iones que hayan quedado sin reaccionar en la superficie. Este ciclo de cuatro pasos se repite hasta obtener el espesor deseado de la película.

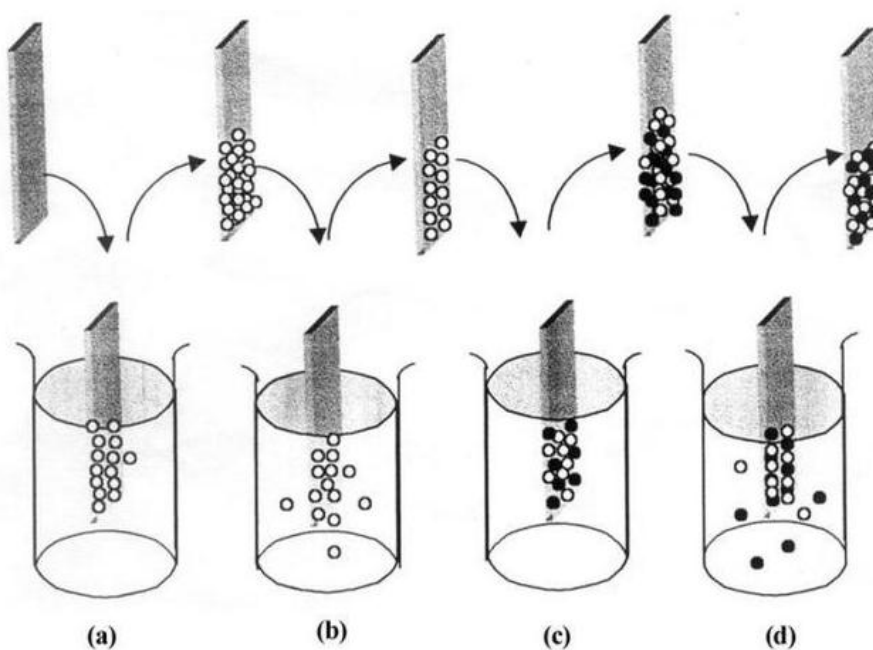


Figura 15. Esquema general del método silar: (a) precursor catiónico, (b) primer enjuague, (c) precursor aniónico y (d) segundo enjuague^[90].

Las características de este método incluyen el crecimiento capa por capa y la separación del precursor en una solución aniónica y otra catiónica, lo cual favorece el control del proceso de deposición de la película.

Entre las ventajas del método silar se encuentran:

- Crecimiento de las películas capa por capa, permitiendo la obtención de películas uniformes.
- Separación de la fuente aniónica y catiónica.

- Control de las propiedades de las películas depositadas al variar las condiciones de depósito (temperatura, pH, estequiometría de los precursores, etc).
- El espesor de la película puede controlarse por el número de ciclos empleados.
- El depósito puede llevarse a cabo a temperatura ambiente.

Esta técnica ha sido muy utilizada en los últimos años para el depósito de películas sobre distintos tipos de sustratos debido a su simplicidad, bajo costo de producción y por su capacidad de implementarse industrialmente sobre superficies relativamente grandes. Debido a esto, y a que permite la obtención de películas homogéneas y el control de sus propiedades, tales como el espesor a través del número de ciclos, es que se seleccionó esta técnica para la preparación de una capa delgada (< 100 nm) del material absorbente (sistema mixto In_2S_3 - Sb_2S_3).

Entre las desventajas del método silar se encuentran los problemas asociados a la solubilidad de los precursores en el medio utilizado y a la baja velocidad de crecimiento de las películas.

II.2.3 Selección del método de preparación de la capa de semiconductor tipo p

Para la preparación de la capa de semiconductor tipo p (CuSCN) se seleccionó el método de impregnación.

El método de recubrimiento por impregnación, también conocido como recubrimiento por saturación, se utiliza comúnmente para recubrir sustratos porosos. Este proceso recubre la superficie interna y rellena los poros del sustrato, lo cual fortalece la estructura del sustrato. Como resultado se obtiene un sustrato modificado sólido con estructura reforzada pero con su flexibilidad original.

Este método consiste en dos pasos. El primer paso involucra la inmersión completa del sustrato en un recipiente que contiene una solución saturada del material a depositar. El proceso de deposición está controlado por la reología de la solución y la receptividad de la superficie del sustrato. El flujo de la solución a través de los poros, lo cual determina la cobertura del depósito, es función de la permeabilidad del sustrato, la viscosidad de la solución y el tiempo que permanece el sustrato en la solución.

En el segundo paso se retira el sustrato de la solución saturada, se elimina el exceso de solución y se deja secar. En la Figura 16 se ilustra este proceso^[91].

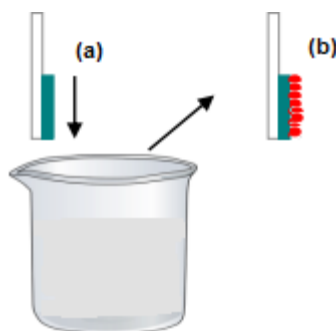


Figura 16. Esquema general del método de recubrimiento por impregnación: (a) inmersión del sustrato en una solución saturada y (b) secado de la película^[91].

Entre las ventajas de este método encontramos que nos permite obtener películas de buena calidad con alta reproducibilidad, y como se mencionó anteriormente, permite realizar depósitos sobre sustratos porosos, es por ello que se seleccionó este método para realizar el depósito de la capa de semiconductor tipo p (CuSCN) sobre el sustrato nanoestructurado de TiO_2 , que tendrá además la capa de material absorbente.

Entre las desventajas de este método se encuentran las dificultades asociadas a la preparación de la solución saturada del material a depositar.

II.3 Etapa 3: Preparación de los materiales y construcción de la celda solar ETA

II.3.1 Preparación de la capa de semiconductor tipo n

A continuación se describen a detalle los reactivos y métodos empleados en la preparación de la capa densa y la capa rugosa de semiconductor tipo n.

II.3.1.1 Preparación de la capa densa de semiconductor tipo n

Se preparó una capa densa de TiO_2 por el método de spin coating utilizando una solución de tetraisopropóxido de titanio ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$) en etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) como precursor del TiO_2 sobre un sustrato de vidrio conductor transparente ITO ($\text{SnO}_2:\text{In}$). El procedimiento se puede describir en los siguientes pasos:

1. Limpieza del sustrato: Se emplearon como sustratos vidrios de ITO (Pilkington, TEC-8, $8\ \Omega/\text{sq}$, 2 cm x 3 cm, área activa: $1.5\ \text{cm}^2$). Los vidrios recibieron un tratamiento previo de limpieza con etanol en un baño de ultrasonido (Branson) durante 15 minutos.
2. Preparación de la solución del precursor del TiO_2 : Se mezclaron 10 mL de etanol absoluto (Fermont) con 3 mL de dietanolamina ($\text{C}_4\text{H}_{11}\text{NO}_2$, 98% Sigma Aldrich), la cual actúa como agente estabilizante. A esta solución se le añadió 3 mL de tetraisopropóxido de titanio (97% Aldrich) en una caja seca (OmniLab) y se dejó en agitación durante 10 minutos. Después de este tiempo se añadió 10 mL más de etanol y se dejó en

agitación durante una hora. La solución preparada se guardó en un recipiente oscuro y se dejó reposar durante 24 horas antes de usarse.

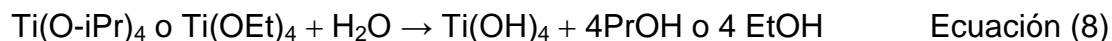
3. Depósito de una película densa de TiO_2 por el método de spin coating:
Se colocó un exceso de la solución del precursor sobre el sustrato de ITO, se rotó a una velocidad de 1000 rpm en el spin coater (ver Figura 17), se dejó secar la película y se sometió a un tratamiento térmico.



Figura 17. Modelo de spin coater utilizado para el depósito de las películas (construido en el laboratorio).

4. Tratamiento térmico de la película: La película se sometió a un tratamiento térmico de 450°C durante 30 minutos en atmósfera de aire en un horno (Carbolite, CMC 1200), la rampa de calentamiento utilizada fue de 5°C por minuto.

En las Ecuaciones 7, 8 y 9 se resume el mecanismo involucrado en la preparación de TiO_2 a partir de una solución precursora de tetraisopropóxido de titanio en etanol:



5. Evaluación de las condiciones de depósito: Se evaluó el efecto de la relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina en la preparación de la solución del precursor, la velocidad de depósito, el tiempo de rotación, la cantidad de solución empleada en el depósito y el perfil de calcinación sobre la absorbancia de las películas. Se eligió este parámetro como factor de respuesta debido a la facilidad de su medición a través de Espectroscopia de Ultravioleta Visible y a la relación que guarda con las propiedades de las películas y su papel en la celda solar, en este caso se busca una película densa que presente absorción mínima. Para obtener la mayor cantidad de información con un número mínimo de experimentos se empleó un diseño de experimentos Taguchi de arreglo L12, el cual se desarrolló evaluando 4 factores a 2 niveles y 1 factor a 3 niveles. Los factores empleados y sus respectivos niveles se resumen en la Tabla II y III. Cada experimento se realizó por triplicado y se obtuvo un promedio de los mismos. Los resultados de los experimentos se presentan en el capítulo de resultados y discusión.

Tabla II. *Diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.*

Nivel	Velocidad de depósito	Tiempo de rotación	Cantidad de solución de precursor	Perfil de calcinación	Relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina
0	1000 rpm	10 s	0.5 mL	450°C-30 min	2 : 1
1	3000 rpm	30 s	1 mL	450°C-60 min	1 : 1
2					1 :2

Tabla III. *Resumen de los experimentos resultantes del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.*

No.	Velocidad de depósito	Tiempo de rotación	Cantidad de solución de precursor	Perfil de calcinación	Relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina
1	1000 rpm	10 s	0.5 mL	450°C-30 min	2 · 1
2	1000 rpm	30 s	0.5 mL	450°C-60 min	2 · 1
3	3000 rpm	10 s	1 mL	450°C-30 min	2 · 1
4	3000 rpm	30 s	1 mL	450°C-60 min	2 · 1
5	1000 rpm	10 s	1 mL	450°C-60 min	1 · 1
6	1000 rpm	30 s	1 mL	450°C-30 min	1 · 1
7	3000 rpm	10 s	0.5 mL	450°C-30 min	1 · 1
8	3000 rpm	30 s	0.5 mL	450°C-60 min	1 · 1
9	1000 rpm	10 s	1 mL	450°C-60 min	1 · 2
10	1000 rpm	30 s	0.5 mL	450°C-30 min	1 · 2
11	3000 rpm	10 s	0.5 mL	450°C-60 min	1 · 2
12	3000 rpm	30 s	1 mL	450°C-30 min	1 · 2

II.3.1.2 Preparación de la capa rugosa de semiconductor tipo n

Sobre la capa densa de TiO_2 se depositó otra capa rugosa por el método de screen printing usando una pasta preparada a partir de nanopartículas comerciales de TiO_2 . El procedimiento se puede describir en los siguientes pasos:

1. Preparación de la pasta de TiO_2 :

- Se pesó 6 g de TiO_2 (P25, Degussa) y se colocó en un mortero de porcelana, se añadió 1 mL de ácido acético (CH_3COOH , J.T. Baker, >97%) y se molió durante 5 minutos.
- Se añadió 5 mL de agua destilada de 1 mL en 1 mL, mezclando tras cada adición, después se añadió 15 mL de etanol con el mismo procedimiento. La pasta se transfirió a un vaso de precipitado utilizando 100 mL de etanol y se colocó en un baño de ultrasonido durante 1 minuto, agitando después de la aplicación del ultrasonido.
- Se añadió 20 g de α -terpineol ($\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$, Aldrich, >96 %), se agitó y se colocó de nuevo en el baño de ultrasonido durante 1 minuto.
- Se añadió una solución de etilcelulosa ($\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_{11}$, Aldrich) en etanol (3 g de etilcelulosa en 30 g de etanol), se agitó y se colocó en el baño de ultrasonido durante 1 minuto.
- Se evaporó el exceso de etanol con un calentamiento suave (50 °C) y se realizó una molienda final de la pasta antes de ser utilizada.

2. Depósito de una película rugosa de TiO_2 por el método de screen printing: Una vez preparada la pasta, se colocaron los sustratos bajo la malla para screen printing (malla de poliéster de $60\ \mu\text{m}$ de apertura, ver Figura 18). Sobre la malla se colocó 3 mL de pasta y se extendió con ayuda del aplicador. La película se dejó secar durante 5 minutos, se retiró la malla y se sometió a un proceso de calcinación.

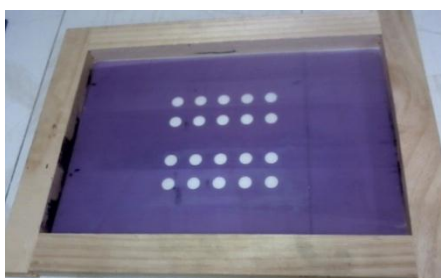


Figura 18. Malla utilizada para el depósito por screen printing ($60\ \mu\text{m}$ de apertura).

3. Tratamiento térmico de la película: La película se sometió a un tratamiento térmico de 450°C durante 30 minutos en atmósfera de aire en un horno (Carbolite, CMC 1200), la rampa de calentamiento utilizada fue de 5°C por minuto.
4. Evaluación del efecto de la viscosidad de la pasta: Debido a que se obtienen diferentes viscosidades de acuerdo al tiempo de evaporación de la pasta, se estudió el efecto de este factor sobre la facilidad de depósito de la misma. La pasta se evaporó durante 15, 30 y 60 minutos, se midió la viscosidad en un viscosímetro Brookfield RV, se prepararon depósitos

por screen printing con las pastas y se llevó a cabo un análisis visual de las películas depositadas.

5. Evaluación del perfil de calcinación sobre la morfología y la rugosidad de la película depositada: Se estudiaron 4 perfiles de calcinación de las películas preparadas por screen printing con el objetivo de seleccionar el perfil de calcinación más adecuado para la obtención de una película nanoestructurada porosa. En la Tabla IV se resumen los perfiles de calcinación estudiados.

Tabla IV. *Perfiles de calcinación estudiados sobre las películas de TiO_2 preparadas por screen printing.*

No. de experimento	Temperatura de calcinación	Tiempo de calcinación
E1	400 °C	30 min
E2	400 °C	60 min
E3	450 °C	30 min
E4	450 °C	60 min

II.3.2 Preparación de la capa absorbente

Sobre la capa rugosa de TiO_2 se depositaron capas delgadas mixtas del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ como capa absorbente por el método silar a temperatura ambiente. El procedimiento se puede describir en los siguientes pasos:

1. Depósito de una capa delgada de In_2S_3 : Se sumergió el sustrato en la solución “A₁” (InCl_3 0.2 M en etanol) (InCl_3 98% Aldrich) durante 9 minutos. Se enjuagó la película con etanol, se secó y se hizo la inmersión en la solución “B₁” (Tioacetamida 0.3 M en etanol) ($\text{C}_2\text{H}_5\text{NS}$ 99% Aldrich) durante 9 minutos. Se enjuagó la película, se secó y se sometió a un tratamiento térmico a vacío (3×10^{-3} Torr) en un horno (Shel Lab 1410) a 150 °C durante 30 minutos. En la Ecuación 10 se resume el proceso de formación del In_2S_3 :



2. Depósito de una capa delgada de Sb_2S_3 : Sobre la película de In_2S_3 se depositó una capa delgada de Sb_2S_3 . La película se sumergió en la solución “A₂” (SbCl_3 0.2 M en etanol) (SbCl_3 98% Aldrich) durante 9 minutos. Se enjuagó la película con etanol, se secó y se hizo la inmersión en la solución “B₂” (Tioacetamida 0.3 M en etanol) durante 9 minutos. Se enjuagó la película, se secó y se sometió a un tratamiento térmico a vacío (3×10^{-3} Torr) en un horno a 150 °C durante 30 minutos. En la Ecuación 11 se resume el proceso de formación del Sb_2S_3 :



Se evaluó el efecto del número de ciclos de depósito sobre la absorbancia de las películas, la concentración de la sal metálica, el tiempo de inmersión, la temperatura de calcinación y el tiempo de calcinación.

Para evaluar las condiciones de depósito se utilizó un diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9, estudiando 4 factores a 3 niveles cada uno. En la Tabla V se resumen los niveles estudiados de cada parámetro y en la Tabla VI se muestran los 9 experimentos resultantes del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.

Tabla V. *Diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.*

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Concentración de la sal metálica	0.1 M	0.2 M	0.3 M
Tiempo de inmersión	5 min	9 min	14 min
Temperatura de calcinación	100 °C	150 °C	200 °C
Tiempo de calcinación	30 min	60 min	90 min

Tabla VI. Experimentos resultantes del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9 para evaluar las condiciones de depósito de la capa absorbente.

Experimento No.	Concentración de la sal metálica	Tiempo de inmersión	Temperatura de calcinación	Tiempo de calcinación
1	0.1 M	5 min	100 °C	30 min
2	0.1 M	9 min	150 °C	60 min
3	0.1 M	14 min	200 °C	90 min
4	0.2 M	5 min	150 °C	90 min
5	0.2 M	9 min	200 °C	30 min
6	0.2 M	14 min	100 °C	60 min
7	0.3 M	5 min	200 °C	60 min
8	0.3 M	9 min	100 °C	90 min
9	0.3 M	14 min	150 °C	30 min

II.3.3 Preparación de la capa de semiconductor tipo p

Sobre la capa absorbente se depositó una capa de CuSCN como semiconductor tipo p. El procedimiento se puede describir en los siguientes pasos:

1. Preparación de la solución de CuSCN: Se preparó una solución 0.05 M de CuSCN (99% Aldrich) en sulfuro de propilo ($C_6H_{14}S$, Aldrich).
2. Depósito de la capa de CuSCN: El depósito se llevó a cabo en condiciones atmosféricas. Se colocó el sustrato sobre una plancha a una

temperatura de 80°C. Se aplicó 1 mL de la solución de CuSCN sobre el sustrato y se dejó secar sobre la plancha a 80°C. Se retiró el sustrato con el depósito y se calcinó a 150°C por 30 minutos utilizando atmósfera de aire en un horno (Carbolite, CMC 1200).

II.3.4 Construcción de la celda solar ETA

Los materiales preparados fueron caracterizados por Espectroscopia de Ultravioleta Visible, Microscopia Electrónica de Barrido, Microscopia de Fuerza Atómica y Difracción de Rayos X. La celda solar ETA se armó con los materiales preparados de acuerdo al diseño mostrado en la Figura 12 del Capítulo I. Finalmente se depositó una capa de oro como contacto eléctrico en un evaporador térmico a vacío (Pelco VIII). El dispositivo armado se caracterizó mediante la curva de corriente-potencial.

II.4 Etapa 4: Caracterización de los materiales y de la celda solar ETA

II.4.1 Caracterización de los materiales

II.4.1.1 Espectroscopia de Ultravioleta Visible

La Espectroscopia de Ultravioleta Visible es una técnica de caracterización óptica que estudia la zona del espectro electromagnético comprendida entre 200 y 800 nm. Esta técnica se basa en la interacción entre un haz de fotones y un material semiconductor, de donde puede generarse una absorción total o parcial de la energía del haz por parte del material.

En dicho fenómeno un fotón transfiere su energía a un electrón, provocando su excitación desde un determinado nivel de energía a uno de energía superior. La absorción óptica en un semiconductor puede ser debida a varios tipos de transiciones, como por ejemplo transiciones banda a banda, transiciones entre niveles localizados y bandas, etc. De esta manera, si se analiza la gráfica de la absorción en función de la energía obtenida a partir de la transmitancia óptica se puede obtener una gran cantidad de información sobre las propiedades del semiconductor y sobre su estructura electrónica. La energía a la que ocurre la absorción indica la separación existente entre los dos niveles implicados en la transición.

En este trabajo se empleó la Espectroscopia de Ultravioleta Visible para determinar la absorción de los materiales preparados. Para esto se utilizó una esfera de integración, obteniendo espectros cuya intensidad viene expresada en unidades de reflectancia (R) en por ciento, tomando como 100% la reflectancia de un blanco (BaSO_4) en todo el rango de las longitudes de onda. El espectro de absorción se obtiene representando $1/R$, o bien la función Kubelka Munk, $F(R)$, (ver Ecuación 12) frente a la longitud de onda.

$$F(R) = (1-R)^2/2R \quad \text{Ecuación (12)}$$

Es posible calcular la energía de banda prohibida de un semiconductor construyendo la curva de Tauc a partir de la siguiente función:

$$(F(R) - h\nu)^n \quad \text{Ecuación (13)}$$

En donde n es un exponente que depende del tipo de transiciones (directas o indirectas) que se llevan a cabo en el semiconductor, h es la constante de Planck y ν es la frecuencia (obtenida del cociente de la velocidad de la luz entre la longitud de onda). Para calcular la energía de banda prohibida de un semiconductor se gráfica la Ecuación 13 contra la energía, este gráfico es conocido como curva Tauc. En esta curva el inicio de la absorción en el semiconductor se identifica por un cambio radical en la curva, a partir del cual se traza una pendiente, cuya intersección con el eje x (energía en eV) nos dará el valor de la energía de banda prohibida del material.

II.4.1.2 Microscopia Electrónica de Barrido

La Microscopia Electrónica de Barrido es una técnica de caracterización que permite analizar la morfología y el tamaño de partícula de los materiales. También permite obtener análisis químicos cuantitativos y cualitativos, así como la distribución superficial de elementos químicos mediante la Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X.

En este trabajo esta técnica se empleó para conocer la morfología, el tamaño de partícula de los materiales depositados, y en el caso de la capa absorbente, para observar la distribución de los sulfuros sobre el sustrato nanoestructurado.

II.4.1.3 Microscopia de Fuerza Atómica

La Microscopia de Fuerza Atómica (AFM) es una técnica que permite llevar a cabo un análisis superficial con una extraordinaria resolución. Esta técnica permite obtener medidas de tamaño de grano, distribución, rugosidad y perfil. Su funcionamiento se basa en la detección de las minúsculas fuerzas atómicas o moleculares de interacción entre una punta y la superficie del material a estudiar. Dicho de forma más simple, se trata de una aguja minúscula (apenas 5 nanómetros) que va recorriendo a cierta distancia la superficie de un material y midiendo la fuerza de los átomos del material. En este trabajo esta técnica se empleó para obtener un perfil de la rugosidad de las capas depositadas de semiconductor tipo n y de material absorbente.

II.4.1.4 Difracción de Rayos X

La Difracción de Rayos X es una técnica que consiste en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal. El haz es difractado en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos dando lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal, aplicando la ley de Bragg. Esta técnica proporciona información sobre el grado de cristalinidad del material, el número de fases presentes, el tipo de fase o si se trata de una solución sólida, además en el caso de los materiales nanocristalinos, se puede realizar una estimación del tamaño de cristal a través de la ecuación de Scherrer.

$$\beta = k\lambda/D\cos\theta \quad \text{Ecuación (14)}$$

Esta ecuación establece que el ancho integral de un pico (β) varía de manera inversamente proporcional al tamaño de cristalito “D”; “k” es un factor de forma con valor cercano a la unidad, “ λ ” la longitud de onda de los rayos X y “ θ ” el ángulo de Bragg. En este trabajo se empleó esta técnica para conocer las fases presentes en los materiales preparados.

II.4.2 Caracterización de la celda solar ETA

II.4.2.1 Curvas de corriente-potencial (I-V)

La eficiencia total de conversión de la celda solar ETA construida mediante la metodología descrita en este capítulo se determinó mediante la curva de corriente-potencial generada en condiciones de iluminación, tomando como ánodo el sustrato nanoestructurado de TiO_2 y como cátodo el contacto de oro. Esta caracterización se llevó a cabo en un potenciostato-galvanostato. Se utilizó una lámpara de Xenón de 150 W como fuente de luz blanca ($\lambda=185\text{-}2000$ nm) para iluminar la celda solar ETA. La intensidad de la lámpara se midió usando un piranómetro (Eplab Spectral).

En un principio se determinó el potencial de circuito abierto de la celda, y a partir de este valor se aplicó un barrido de potencial midiendo la corriente generada en condiciones de oscuridad y de iluminación. La medición finalizó cuando la diferencia de potencial entre los electrodos fue igual a cero. Estas mediciones se realizaron por triplicado, sin embargo los valores no se promediaron ya que de hacerlo la forma de la curva se distorsiona. Es por ello que en la sección de resultados se muestra la curva I-V obtenida de una celda representativa. A partir de la curva de corriente potencial (ver Figura 7, Capítulo I) se obtuvieron los parámetros más importantes de la celda: corriente de corto circuito (I_{sc}), voltaje a circuito abierto (V_{oc}), corriente máxima generada (I_{max}) y voltaje máximo generado (V_{max}).

La potencia máxima de la celda, P_{max} , se calculó a partir de la corriente máxima generada (I_{max}) y el voltaje máximo generado (V_{max}) empleando la Ecuación 4 mostrada en el Capítulo 1:

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad \text{Ecuación (4)}$$

El factor de llenado de la celda, el cual mide la potencia máxima de la celda comparada a la potencia máxima hipotética para un valor dado de I_{sc} y V_{oc} , se calculó con la Ecuación 6 mostrada en el Capítulo I:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Finalmente, la eficiencia total de la celda (η) se calculó con la Ecuación 5 descrita en el Capítulo I:

$$\eta = \frac{P_{max}}{ExA_c} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde E es la irradiancia en W/m^2 y A_c es el área de la celda en m^2 .

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, así como una discusión de los mismos.

III.1 Evaluación de las condiciones de depósito de los materiales

III.1.1 Evaluación de las condiciones de depósito de la capa densa de semiconductor tipo n

Como se describió en la sección II.3.1.1, se empleó un diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12 para evaluar las condiciones de depósito de una película densa de TiO_2 mediante la técnica de spin coating. Se evaluó el efecto de la relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina en la preparación de la solución del precursor, la velocidad de depósito, el tiempo de rotación, la cantidad de solución empleada en el depósito y el perfil de calcinación sobre la absorbancia de las películas.

Además de estudiar la influencia de los factores descritos sobre la absorbancia de las películas, este diseño de experimentos sirvió para obtener las condiciones óptimas para la preparación de una película densa de TiO_2 de bajo espesor y absorbancia mínima mediante la técnica de spin coating.

Las características de la película que se buscan (bajo espesor y absorbancia mínima) es debido a que esta capa desempeña una función únicamente de anclaje entre la capa rugosa de TiO_2 y el sustrato de vidrio, además de evitar que entren en contacto el semiconductor tipo p con el sustrato y se genere corto circuito en la celda. Es por ello que se eligió la absorbancia como respuesta de los experimentos. La absorbancia se midió a través de Espectroscopia de Ultravioleta Visible, tomando como referencia un valor de longitud de onda de 385 nm, que corresponde al valor máximo de absorción que presenta el TiO_2 . Se prepararon las películas por triplicado de acuerdo a las condiciones establecidas en cada experimento y se obtuvo un promedio de la absorbancia.

En la Tabla VII se presenta la absorbancia obtenida de las películas preparadas bajo las condiciones establecidas en los 12 experimentos resultantes del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.

Tabla VII. Absorbancia de las películas de TiO_2 preparadas por la técnica de spin coating bajo las condiciones derivadas del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.

Experimento No.	Absorbancia medida a $\lambda = 385 \text{ nm}$			Absorbancia promedio	Desviación estándar
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3		
1	0.076	0.097	0.088	0.087	0.011
2	0.074	0.106	0.086	0.089	0.016
3	0.070	0.079	0.093	0.081	0.012
4	0.075	0.073	0.086	0.078	0.007
5	0.071	0.061	0.076	0.069	0.008
6	0.054	0.069	0.083	0.069	0.015
7	0.070	0.072	0.068	0.070	0.002
8	0.068	0.065	0.064	0.066	0.002
9	0.065	0.053	0.044	0.054	0.011
10	0.051	0.062	0.053	0.055	0.006
11	0.066	0.053	0.069	0.063	0.009
12	0.053	0.053	0.063	0.056	0.006

De acuerdo a lo observado en la Tabla VII, las películas preparadas bajo las condiciones del experimento número 9 presentaron la menor absorbancia, por lo que se seleccionaron como las condiciones definitivas para la preparación de la capa densa de TiO_2 por la técnica de spin coating.

Las condiciones del experimento 9 se describen como sigue:

- Velocidad de depósito: 1000 rpm
- Tiempo de rotación: 10 s
- Cantidad de solución de precursor: 1 mL
- Perfil de calcinación: 450°C-60 min
- Relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina: 1:2

Para conocer el efecto individual de cada factor sobre la absorbancia de las películas se promediaron los experimentos que poseen el mismo nivel de cada factor. Es decir, para los factores que se estudiaron a dos niveles (velocidad de depósito, tiempo de rotación, cantidad de solución de precursor y perfil de calcinación) se promedió la absorbancia de los 6 experimentos que se estudiaron con el nivel 0 de ese factor y los 6 experimentos que se estudiaron con el nivel 1. En el caso de la relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina, estudiada a 3 niveles, se promediaron los 4 experimentos estudiados con el nivel 0, los 4 estudiados con el nivel 1 y los 4 estudiados con el nivel 2.

En la Tabla VIII se muestran los promedios de las respuestas obtenidas de los experimentos realizados al mismo nivel de cada factor.

Tabla VIII. *Absorbancia promedio de los experimentos estudiados al mismo nivel de cada factor en el diseño de experimentos Taguchi con arreglo L 12.*

Factor	Nivel	Absorbancia promedio
Velocidad de depósito	0	0.071
	1	0.069
Tiempo de rotación	0	0.071
	1	0.069
Cantidad de solución de precursor	0	0.072
	1	0.068
Perfil de calcinación	0	0.070
	1	0.070
Relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina	0	0.084
	1	0.068
	2	0.057

A partir de estos datos se construyó una gráfica de respuesta (ver Figura 24), en la cual se aprecia el efecto individual de cada factor sobre la absorbancia.

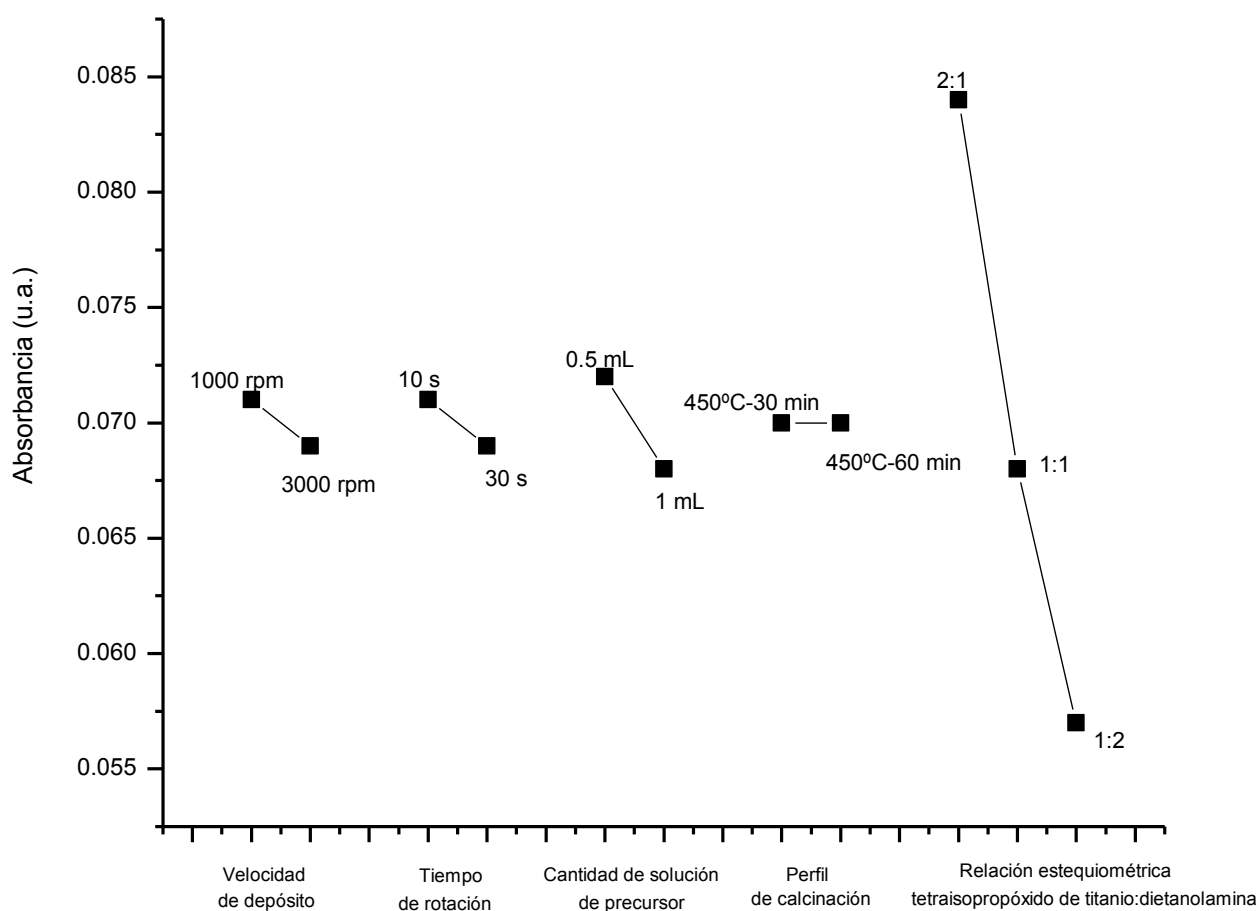


Figura 24. Gráfica de respuesta para evaluar el efecto de cada factor sobre la absorbancia en el diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12.

A partir del comportamiento observado en la Figura 24 se pudo establecer que la variación en la velocidad de depósito, el tiempo de rotación, la cantidad de solución de precursor y el perfil de calcinación no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia de las películas. Por otra parte, se encontró que la absorbancia se ve fuertemente afectada por la relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina, siendo la relación más favorable la

1:2. Esto corresponde con la absorbancia obtenida de las películas, ya que los experimentos con la relación estequiométrica 1:2 (experimentos 9, 10, 11 y 12) fueron los que arrojaron la menor absorbancia, mientras que los experimentos con la relación estequiométrica 2:1 (experimentos 1, 2, 3 y 4) presentaron la mayor absorbancia.

El efecto de los factores sobre la absorbancia de las películas se confirmó además mediante un análisis estadístico ANOVA (ver Apéndice C), en donde el valor de la función F obtenido para los factores velocidad de depósito, tiempo de rotación, cantidad de solución de precursor y perfil de calcinación, fue menor que el valor de F crítico, de donde se infirió que estos factores no tienen un efecto significativo sobre la absorbancia. En el caso de la relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina, el valor de la función F obtenido fue mayor que el valor de F crítico, confirmando así que este factor tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

Estos resultados concuerdan con el trabajo reportado en el 2013 por B. Shivaraj y colaboradores^[92], quienes estudiaron la influencia de los parámetros de depósito (concentración del precursor, volumen de solución, tiempo de rotación y velocidad de rotación) sobre la morfología de películas delgadas de ZnO preparadas por la técnica de spin coating utilizando un diseño de




experimentos Taguchi. Ellos encontraron que la concentración del precursor influye significativamente sobre el espesor y la rugosidad de las películas.

III.1.2 Evaluación de las condiciones de depósito de la capa rugosa de semiconductor tipo n

III.1.2.1 Efecto de la viscosidad de la pasta

Al emplear la técnica de screen printing uno de los factores que debe cuidarse para obtener películas homogéneas es la viscosidad de la pasta. Ésta a su vez depende del nivel de evaporación del etanol en la misma, es por ello que se prepararon pastas con tres tiempos de evaporación diferentes (15, 30 y 60 minutos), se midió su viscosidad y se determinó mediante un análisis visual la viscosidad más adecuada para la preparación de películas homogéneas. En la Tabla IX se presentan las viscosidades obtenidas de las pastas y el análisis visual de las películas preparadas con las mismas.

Tabla IX. Viscosidad obtenida de las pastas a diferentes tiempos de evaporación y análisis visual de las películas preparadas con las mismas.

Experimento no.	Tiempo de evaporación de la pasta	Viscosidad de la pasta (25 °C)	Análisis visual de las películas
1	15 min	30,000 mPa•s	
2	30 min	60,000 mPa•s	
3	60 min	100,000 mPa•s	

De acuerdo a lo observado en la Tabla IX, la pasta preparada con un tiempo de evaporación de 60 minutos y una viscosidad de 100,000 mPa•s es la que permitió el depósito de películas más uniformes, por lo que se tomaron estas condiciones como definitivas para la preparación de la pasta de TiO₂.

En la literatura existen muy pocos reportes sobre la viscosidad de las pastas empleadas para el depósito de películas de TiO₂ por screen printing, a pesar de que el método es muy utilizado. Así, entre los reportes encontrados está el de Alkire y colaboradores^[93] en el 2010, en el cual hacen alusión a que la

viscosidad de la pasta de TiO_2 puede variar dependiendo de la relación de agua y etanol añadidos a la pasta en un rango de 20 a 2000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, mientras que la empresa Fuji Asl Solar Series comercializa una pasta prefabricada de TiO_2 específicamente para la construcción de celdas solares con una viscosidad en un rango de entre 50,000 a 300,000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ^[94], el cual se asemeja más a las viscosidades medidas en las pastas preparadas en este trabajo.

III.1.2.2 Efecto del perfil de calcinación

Con el propósito de seleccionar el perfil de calcinación más adecuado para la obtención de una película nanoestructurada porosa de TiO_2 , se evaluó el efecto de la temperatura y el tiempo de calcinación sobre la morfología y la rugosidad de las películas. Se estudiaron dos temperaturas (400°C y 450°C) y dos tiempos de calcinación (30 min y 60 min) en 4 perfiles de calcinación diferentes. La morfología de las películas preparadas se observó a través de Microscopia Electrónica de Barrido y la rugosidad de las películas se obtuvo por Microscopia de Fuerza Atómica.

En la Figura 25 se muestran las imágenes obtenidas por Microscopia Electrónica de Barrido de las películas de TiO_2 preparadas con 4 perfiles de calcinación diferentes y en la Tabla X se resumen las condiciones de los perfiles de calcinación, las morfologías observadas y las rugosidades medidas en las películas.

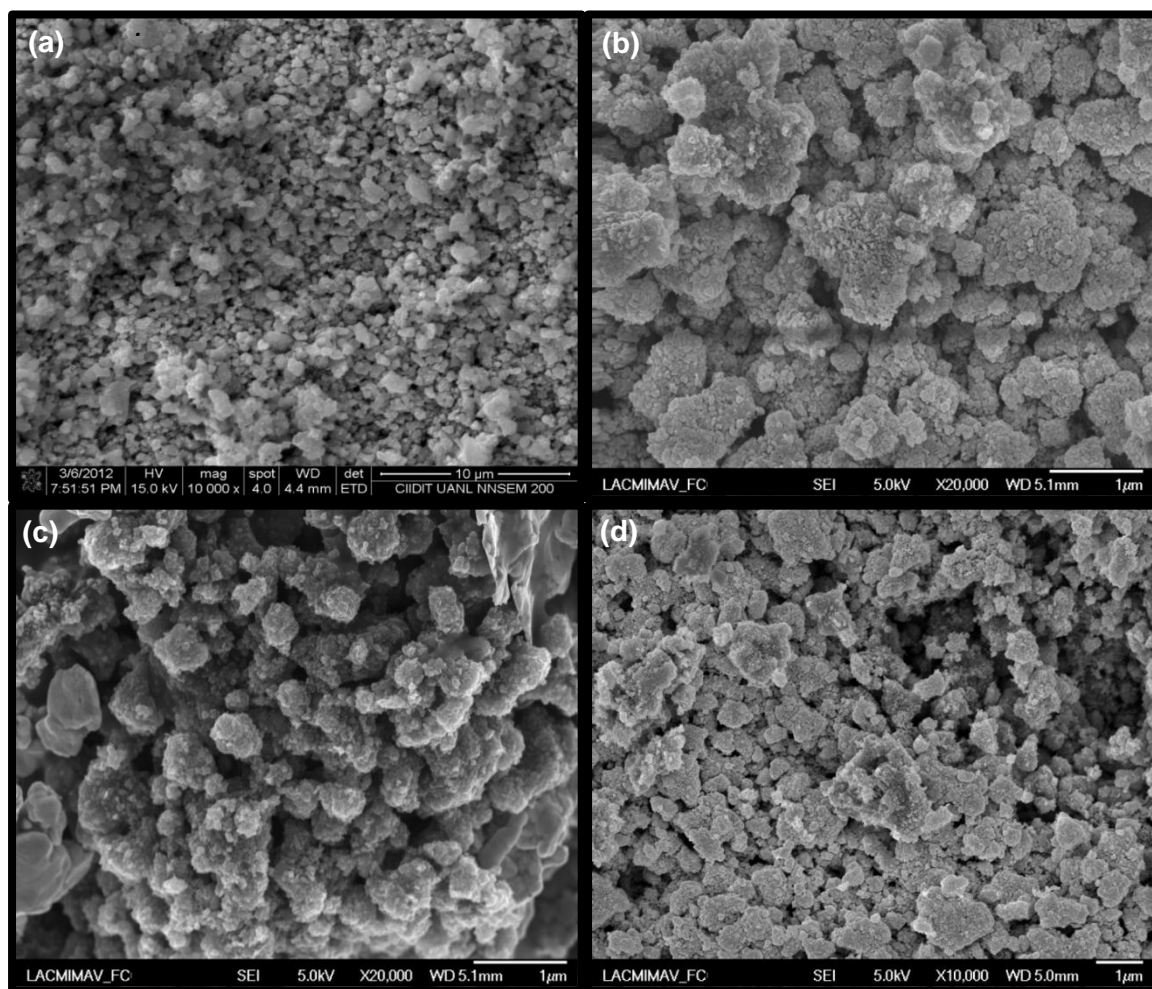


Figura 25. Morfología de las películas de TiO_2 preparadas por screen printing usando 4 perfiles de calcinación diferentes: (a) 400°C-30 min, (b) 400°C-60 min, (c) 450°C-30 min y (d) 450°C-60 min.

Tabla X. *Resumen del efecto del perfil de calcinación sobre la morfología y la rugosidad de las películas de TiO₂ preparadas por screen printing.*

No. de experimento	Temperatura de calcinación	Tiempo de calcinación	Morfología observada	Rugosidad
E1	400°C	30 min	Granos pequeños	108 nm
E2	400°C	60 min	Mayor crecimiento de granos Aglomeración de partículas	103 nm
E3	450°C	30 min	Granos pequeños	118 nm
E4	450°C	60 min	Mayor crecimiento de granos Aglomeración de partículas	110 nm

A partir de los resultados observados en la Figura 25 y la Tabla X, se infirió el efecto de la temperatura y el tiempo de calcinación sobre la morfología y la rugosidad de las películas de TiO₂ preparadas por la técnica de screen printing. De acuerdo a lo observado, tiempos mayores de calcinación conducen a la obtención de granos de mayor tamaño, a la formación de aglomerados y a la obtención de bajas rugosidades. En relación a la temperatura de calcinación, se obtuvo una mayor rugosidad a 450°C, por lo que se definió que el perfil de calcinación más adecuado para la obtención de películas rugosas depositadas por la técnica de screen printing es de 450°C por 30 minutos.

III.1.3 Evaluación del efecto del número de ciclos y de las condiciones de depósito de la capa absorbente

III.1.3.1 Efecto del número de ciclos

Se depositaron películas delgadas del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ por el método silar, mediante el procedimiento y las condiciones descritas en la sección II.3.2 del Capítulo II y se evaluó el efecto del número de ciclos sobre la absorbancia de las películas. Cada ciclo involucró el depósito de una película de In_2S_3 y una película de Sb_2S_3 . La absorbancia de las películas se midió por Espectroscopia de Ultravioleta Visible.

En la Figura 26 (a) se presenta la absorbancia obtenida de las películas depositadas por el método silar con un número de ciclos de 0 a 9 del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$. Se depositaron hasta 9 ciclos de material absorbente debido a que como se mostrará más adelante, el incremento en la absorbancia tras el ciclo de depósito número 5 fue mínimo.

En la Figura 26 (b) se muestra el efecto del número de ciclos sobre la absorbancia de las películas a 590 nm y 688 nm. Los valores de 590 nm y 688 nm se tomaron como referencia dado que corresponden a la región teórica del espectro en donde el In_2S_3 y el Sb_2S_3 absorben luz con energía suficiente para separar cargas. Dicho valor de longitud de onda se calculó a partir de la Ecuación (3), utilizando el valor de la constante de Planck (h) en unidades de

electrón-volt por segundo (eV·s) y la velocidad de la luz (c), tal como se muestra a continuación:

$$E = hc/\lambda \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$\lambda = hc/E$$

$$\lambda = (4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})/E$$

$$\lambda_{\text{nm}} = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}/E_{\text{eV}}$$

$$\lambda_{\text{nm}} \text{In}_2\text{S}_3 = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}/2.10 \text{ eV} = 590 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{nm}} \text{In}_2\text{S}_3 = 590 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{nm}} \text{Sb}_2\text{S}_3 = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}/1.80 \text{ eV} = 688 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{nm}} \text{Sb}_2\text{S}_3 = 688 \text{ nm}$$

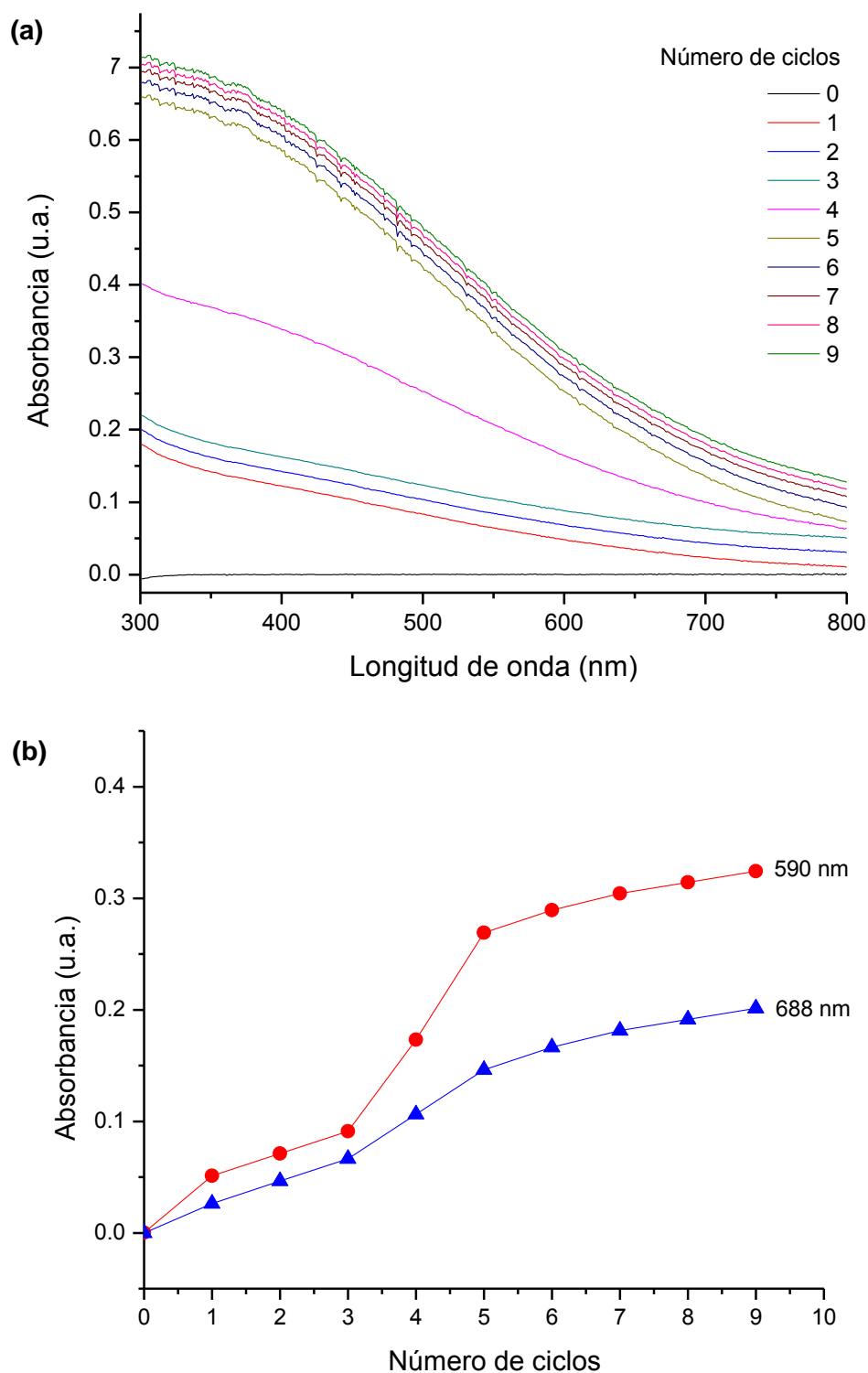


Figura 26. (a) Absorbancia obtenida de las películas depositadas por el método silar con un número de ciclos de 0 a 9 del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ y (b) efecto del número de ciclos sobre la absorbancia de las películas a 590 nm y 688 nm.

Como se aprecia en la Figura 26 (a), la absorbancia experimenta un incremento directamente proporcional al número de ciclos de depósito del material absorbente, siendo mayor el incremento en la absorbancia entre los ciclos de depósito número 4 y 5. A partir del ciclo de depósito número 5, el incremento observado en la absorbancia es muy pequeño, comparado al incremento producido por los primeros ciclos.

De acuerdo a la gráfica presentada en la Figura 26 (b), se presentó una absorbancia mayor a una longitud de onda de 590 nm. La absorbancia a 688 nm puede adjudicarse a la absorción por parte del Sb_2S_3 , mientras que la absorbancia a 590 nm puede adjudicarse a la absorción por parte de del In_2S_3 y del Sb_2S_3 , ya que a esta longitud de onda los dos compuestos presentan absorción. Por lo tanto, es razonable que la absorbancia presentada por las películas a 590 nm sea mayor que la presentada a 688 nm.

Con el objetivo de obtener películas delgadas de material absorbente con una buena relación de absorbancia:espesor se midió la rugosidad de las mismas para tener una idea de su espesor. La rugosidad de las películas se midió a través de Microscopia de Fuerza Atómica.

En la Figura 27 se presenta la rugosidad obtenida de las películas preparadas con diferente número de ciclos de depósito de material absorbente.

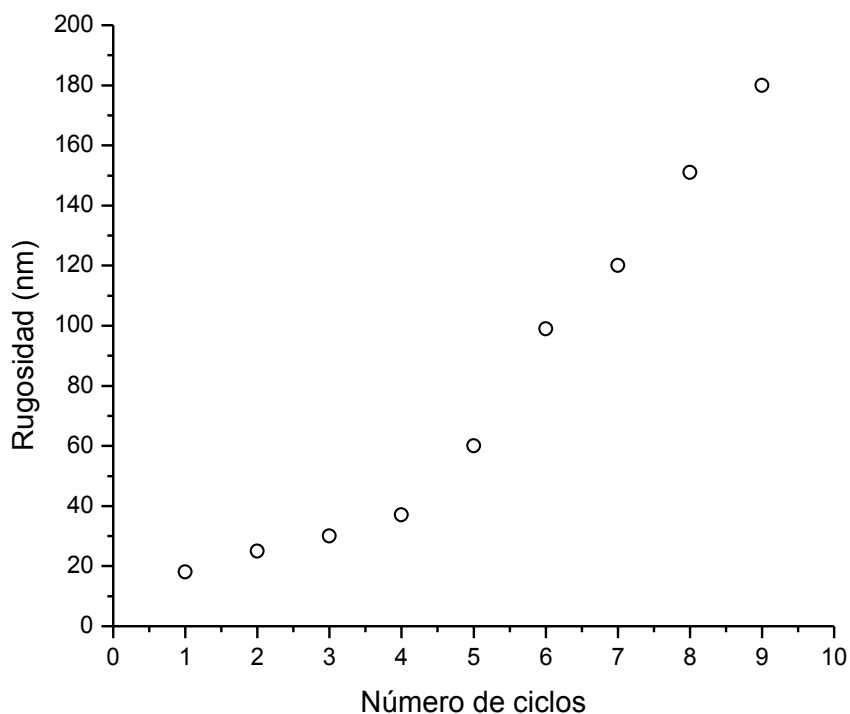


Figura 27. *Rugosidad obtenida de las películas preparadas con diferente número de ciclos de depósito de material absorbente.*

Como se aprecia en la Figura 27, la rugosidad aumenta proporcionalmente con el número de ciclos de depósito de material absorbente, sufriendo un incremento mayor después del ciclo de depósito número 5. La rugosidad presentada por las películas después del ciclo de depósito número 5 supera los 100 nm. Debido a que en este trabajo se planteó el depósito de una capa extremadamente delgada (< 100 nm) de material absorbente, el número de ciclos de depósito que nos ofrece una mejor relación de absorbancia:espesor es 5.

III.1.3.2 Evaluación de las condiciones de depósito de la capa absorbente

Como se describió en la sección II.3.2, se empleó un diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9 para evaluar las condiciones de depósito de la capa absorbente mediante el método silar. Se evaluó el efecto de la concentración de la sal metálica, el tiempo de inmersión, la temperatura de calcinación y el tiempo de calcinación sobre la absorbancia de las películas.

La característica más importante que debe tener un material para que sea elegido como capa absorbente en una celda solar es que presente alta absorción en el rango visible del espectro, es por ello que se eligió como factor de respuesta la absorbancia, en orden de obtener una película de alta absorbancia con las condiciones óptimas de depósito. La absorbancia de las películas se midió por Espectroscopia de Ultravioleta Visible, tomando como referencia un valor de longitud de onda de 590 nm, debido a que a esta longitud de onda los dos compuestos del sistema In_2S_3 - Sb_2S_3 presentan absorción. Se prepararon las películas por triplicado de acuerdo a las condiciones establecidas en cada experimento y se obtuvo un promedio de la absorbancia. En la Tabla XI se presenta la absorbancia obtenida de las películas preparadas bajo las condiciones establecidas en los 9 experimentos resultantes del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.

Tabla XI. Absorbancia de las películas de $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ preparadas por el método silar bajo las condiciones derivadas del diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.

Experimento No.	Absorbancia medida a $\lambda = 590 \text{ nm}$			Absorbancia promedio	Desviación estándar
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3		
1	0.168	0.166	0.168	0.167	0.001
2	0.186	0.188	0.188	0.187	0.001
3	0.202	0.208	0.200	0.203	0.004
4	0.218	0.215	0.209	0.214	0.005
5	0.215	0.214	0.214	0.214	0.001
6	0.214	0.212	0.210	0.212	0.002
7	0.228	0.228	0.229	0.228	0.001
8	0.238	0.239	0.232	0.236	0.004
9	0.244	0.240	0.248	0.244	0.004

De acuerdo a lo observado en la Tabla XI, las películas preparadas bajo las condiciones del experimento número 9 presentaron la mayor absorbancia, por lo que se seleccionaron como las condiciones definitivas para la preparación de la capa absorbente por el método silar.

Las condiciones del experimento 9 se describen como sigue:

- Concentración de la sal metálica: 0.3 M
- Tiempo de inmersión: 14 min
- Temperatura de calcinación: 150°C
- Tiempo de calcinación: 30 min

Para conocer el efecto individual de cada factor sobre la absorbancia de las películas se promediaron los experimentos que poseen el mismo nivel de cada factor. Dado que cada factor se estudió a tres niveles, se promedió la absorbancia de los tres experimentos estudiados al nivel 0, los tres estudiados al nivel 1 y los tres estudiados al nivel 2. En la Tabla XII se muestran los promedios de las respuestas obtenidas de los experimentos realizados al mismo nivel de cada factor.

Tabla XII. Absorbancia promedio de los experimentos estudiados al mismo nivel de cada factor en el diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.

Factor	Nivel	Absorbancia promedio
Concentración de la sal metálica	0	0.186
	1	0.213
	2	0.236
Tiempo de inmersión	0	0.203
	1	0.213
	2	0.220
Temperatura de calcinación	0	0.205
	1	0.215
	2	0.215
Tiempo de calcinación	0	0.209
	1	0.209
	2	0.218

A partir de estos datos se construyó una gráfica de respuesta (ver Figura 28), en la cual se aprecia el efecto individual de cada factor sobre la absorbancia.

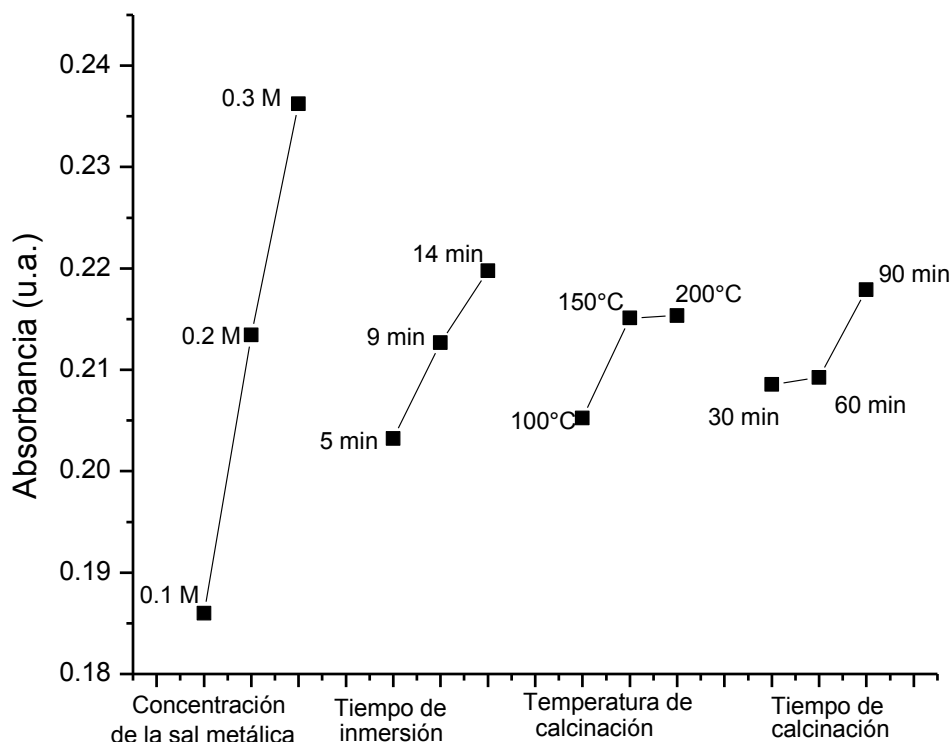


Figura 28. Gráfica de respuesta para evaluar el efecto de cada factor sobre la absorbancia en el diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9.

A partir del comportamiento observado en la Figura 28 se pudo establecer que la variación en el tiempo de inmersión, la temperatura de calcinación y el tiempo de calcinación, no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia de las películas. Por otra parte, se encontró que la absorbancia se

ve afectada significativamente por la concentración de la sal metálica, siendo el nivel más favorable el 2, el cual corresponde a una concentración de 0.3 M. Esto concuerda con la absorbancia obtenida de las películas, ya que los experimentos que utilizaron una concentración de sal metálica de 0.3 M (experimentos 7, 8 y 9) fueron los que arrojaron la mayor absorbancia.

El efecto de los factores sobre la absorbancia de las películas se confirmó además mediante un análisis estadístico ANOVA (ver Apéndice C), en donde el valor de la función F obtenido para los factores tiempo de inmersión, temperatura de calcinación y tiempo de calcinación, fue menor que el valor de F crítico, de donde se infirió que estos factores no tienen un efecto significativo sobre la absorbancia. En el caso de la concentración de la sal metálica, el valor de la función F obtenido fue mayor que el valor de F crítico, confirmando así que este factor tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

III.2 Caracterización de los materiales

III.2.1 Caracterización de la capa densa de semiconductor tipo n

A continuación se presentan los resultados de la caracterización de la capa densa de TiO_2 depositada mediante la técnica de spin coating bajo las condiciones óptimas establecidas en la sección III.1.1 (velocidad de depósito: 1000 rpm, tiempo de rotación: 10 s, cantidad de solución de precursor: 1mL,

perfil de calcinación: 450°C-60 min y relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina: 1:2).

III.2.1.1 Espectroscopia de Ultravioleta Visible

Una de las características más importantes de los materiales preparados para la construcción de la celda solar es su espectro de absorción, es por ello que se determinó a través de la Espectroscopia de Ultravioleta Visible usando una esfera de integración y midiendo la reflectancia difusa, a partir de la cual se obtuvo la función Kubelka Munk, como se explicó en la sección II.4.1.1 del Capítulo II.

En la Figura 29 se presenta la gráfica de Kubelka Munk de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.

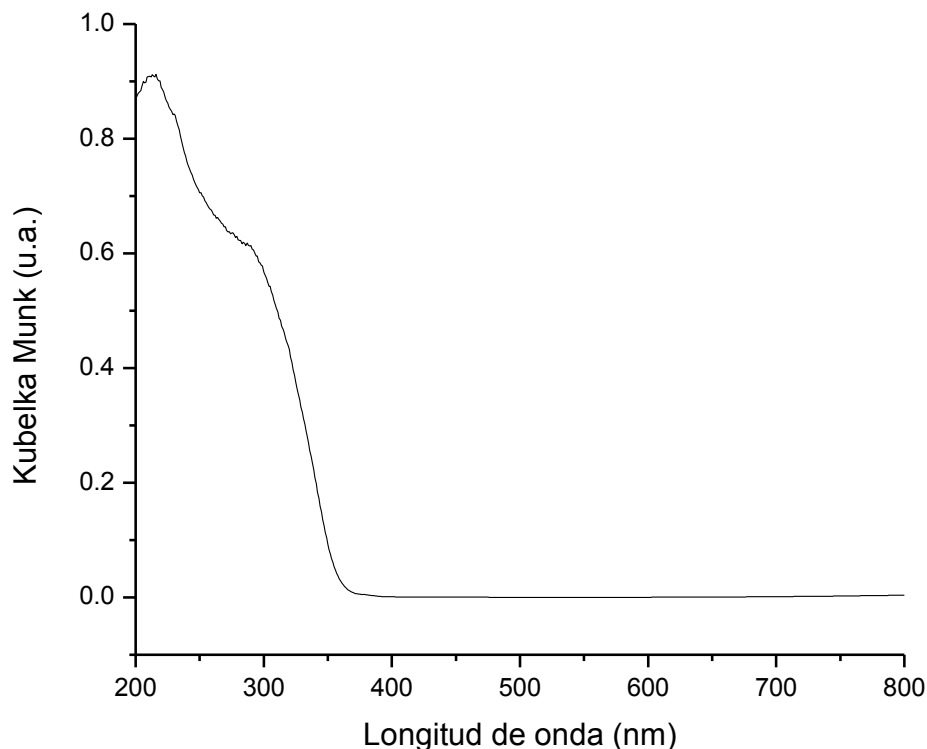


Figura 29. Gráfica de Kubelka Munk de la película de TiO_2 preparada por la técnica de *spin coating*.

Como se observa en la Figura 29, el espectro de absorción obtenido corresponde con el esperado para el TiO_2 , ya que este absorbe energía en longitudes de onda por debajo de los 400 nm.

La energía de banda prohibida de la película preparada se calculó construyendo la curva Tauc (ver Figura 30), usando un valor de n de $\frac{1}{2}$ debido a que el TiO_2 presenta transiciones indirectas^[95]. Para obtener el valor de la energía de banda prohibida (E_g) se extrapoló la parte lineal de la curva Tauc hasta encontrar su intersección con el eje x. Se obtuvo un valor de energía de banda prohibida de 3.28 eV, el cual se encuentra dentro del valor reportado para el TiO_2 .

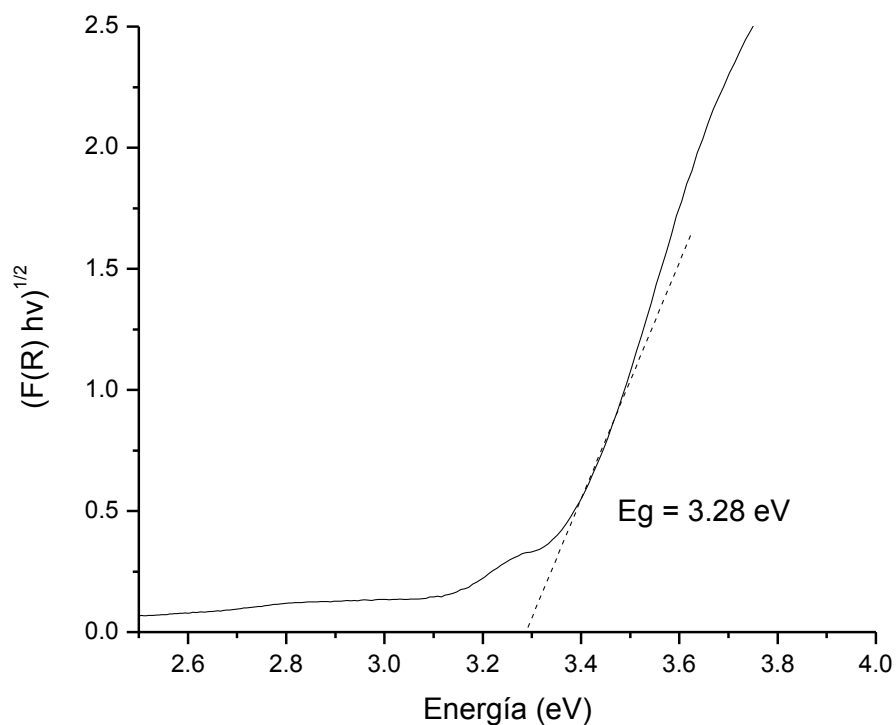


Figura 30. Curva Tauc de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.

III.2.1.2 Difracción de Rayos X

Se utilizó la técnica de Difracción de Rayos X para caracterizar la estructura cristalina de las películas preparadas e identificar las fases presentes, las condiciones en las que se obtuvieron los difractogramas se describieron en la sección II.4.1.4 del Capítulo II.

En la Figura 31 se presenta el patrón de difracción de rayos X obtenido de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.

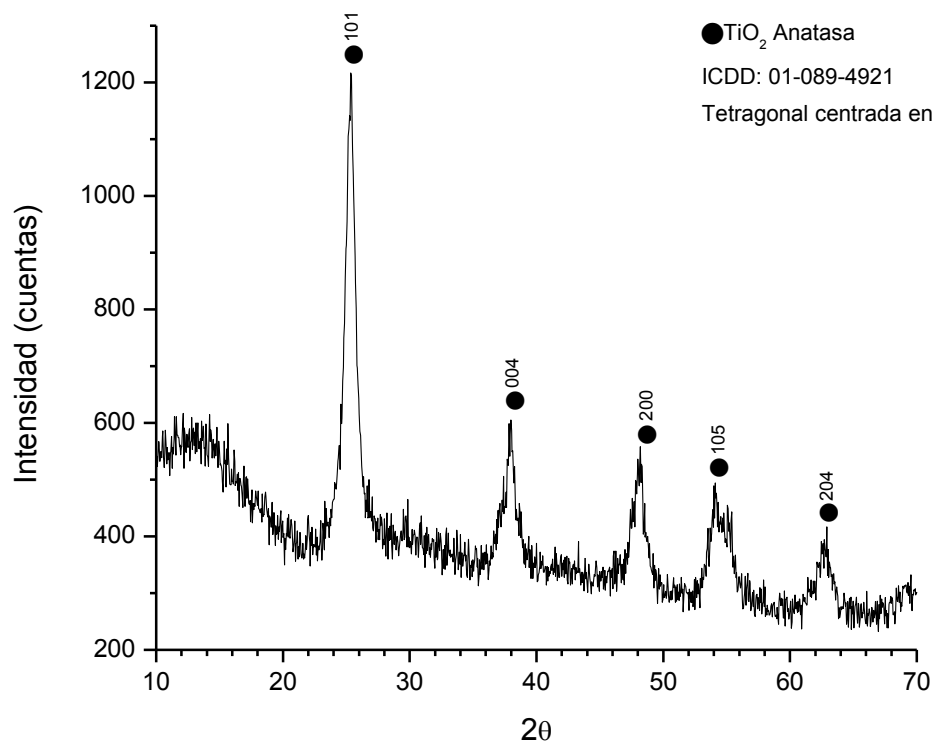


Figura 31. Patrón de difracción de rayos X de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.

Como se observa en la Figura 31, el patrón de difracción de rayos X de la película de TiO_2 preparada por spin coating exhibe los picos de difracción característicos de la fase anatasa (ICDD: 01-089-4921), de estructura tetragonal centrada en el cuerpo.

A partir de la ecuación de Scherrer se obtuvo el tamaño de cristal de la película, obteniendo un valor de 10.0 nm. El ligero ensanchamiento en los picos de difracción puede explicarse por la presencia de pequeños cristales.

La obtención de la fase anatasa fue favorecida por el perfil de calcinación empleado (450°C-60 min) y por el método de sol gel usado en la preparación del precursor.

III.2.1.3 Microscopia Electrónica de Barrido

Se empleó la Microscopia Electrónica de Barrido para observar la morfología y el tamaño de partícula de las películas depositadas.

En la Figura 32 se presenta la imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la película de TiO₂ preparada por la técnica de spin coating.

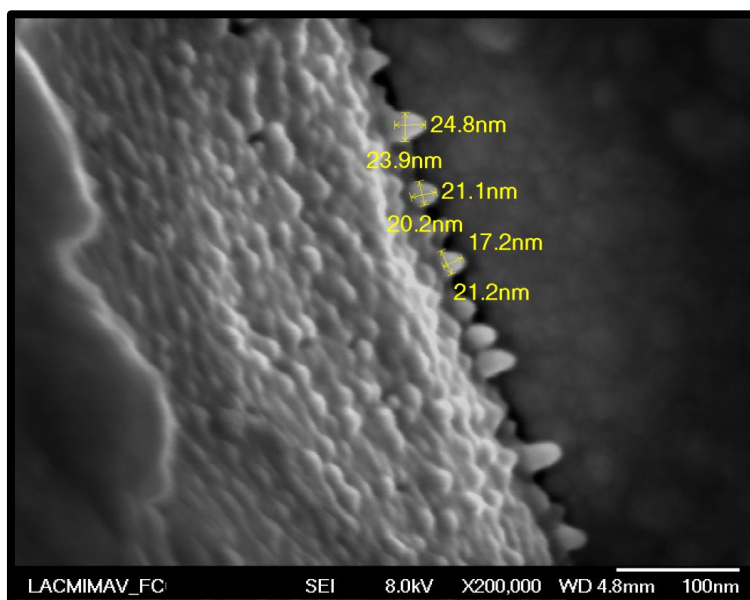


Figura 32. Imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.

Como se observa en la Figura 32, la zona en donde se tomó la imagen presenta un depósito de partículas distribuidas de manera homogénea. Las partículas observadas presentan formas irregulares, con un tamaño uniforme de alrededor de 20 nm.

III.2.1.4 Microscopia de Fuerza Atómica

Se empleó la Microscopia de Fuerza Atómica para obtener un perfil de la rugosidad de las películas preparadas. Las condiciones de medición se especificaron en la sección II.4.1.3 del Capítulo II.

En la Figura 33 se presenta el perfil de rugosidad obtenido por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de TiO_2 preparada por spin coating.

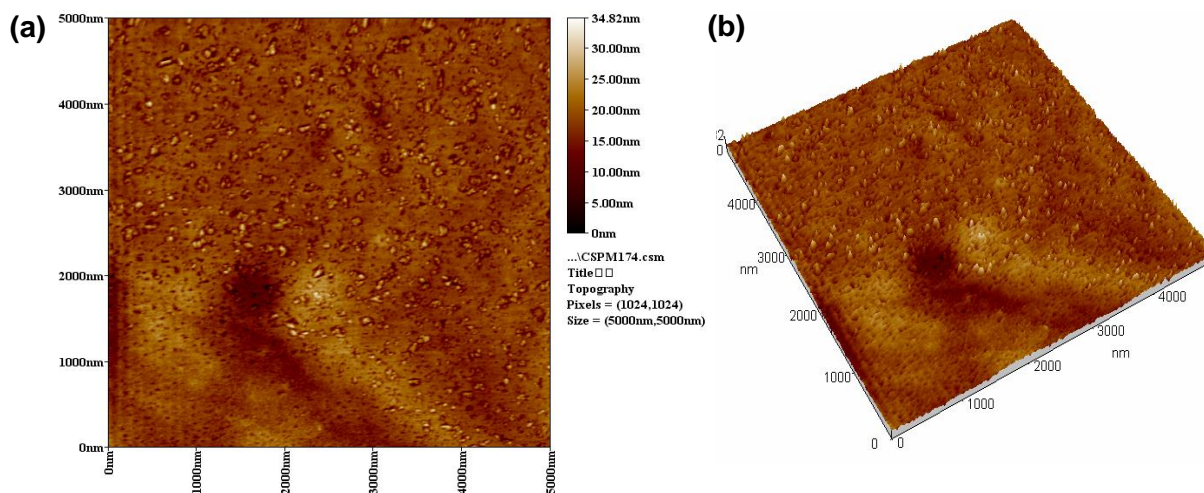


Figura 33. Imágenes obtenidas del análisis (a) seccional y (b) tridimensional por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de TiO_2 preparada por la técnica de spin coating.

Como se observa en la Figura 33, la rugosidad estimada de la película de TiO_2 preparada por spin coating es de alrededor de 34.82 nm.

La imagen obtenida por Microscopia de Fuerza Atómica revela una superficie de morfología homogénea con partículas de tamaño de grano regular dentro de la escala nanométrica.

III.2.2 Caracterización de la capa rugosa de semiconductor tipo n

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización óptica, morfológica y estructural de la película rugosa de TiO_2 depositada por screen printing bajo el procedimiento descrito en la sección II.3.1.2 del Capítulo II, con una pasta de viscosidad de $100,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, y un perfil de calcinación de 450°C por 30 minutos.

III.2.2.1 Espectroscopia de Ultravioleta Visible

En la Figura 34 se presenta la gráfica de Kubelka Munk de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.

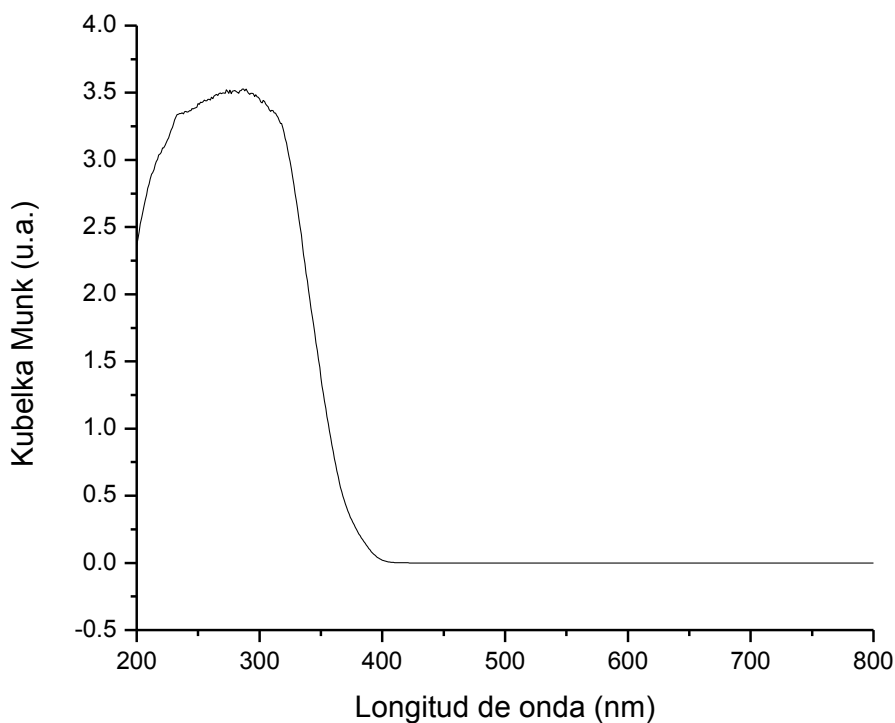


Figura 34. Gráfica de Kubelka Munk de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.

Como se observa en la Figura 34, el espectro de absorción de la película de TiO_2 preparada por screen printing, al igual que el de la película preparada por spin coating, corresponde con el espectro esperado para el TiO_2 , presentando absorción en la región ultravioleta del espectro visible.

La energía de banda prohibida de la película preparada se obtuvo a partir de la curva Tauc (ver Figura 35), con el mismo procedimiento descrito en la sección anterior. Se obtuvo un valor de energía de banda prohibida de 3.03 eV.

Esta disminución en la energía de banda prohibida en la película preparada por screen printing con respecto a la preparada por spin coating, puede deberse, como se verá en el patrón de difracción de rayos X, a la presencia de la fase rutilo, ya que la pasta a partir de la cual se efectuó el depósito por screen printing se preparó a partir de nanopartículas de TiO_2 P25 Degussa, las cuales tienen en su composición como fase principal la anatasa y como fase secundaria el rutilo. Asimismo, la energía de banda prohibida reportada para la anatasa es de 3.20 eV^[96], mientras que para el rutilo es de 3.02 eV^[96].

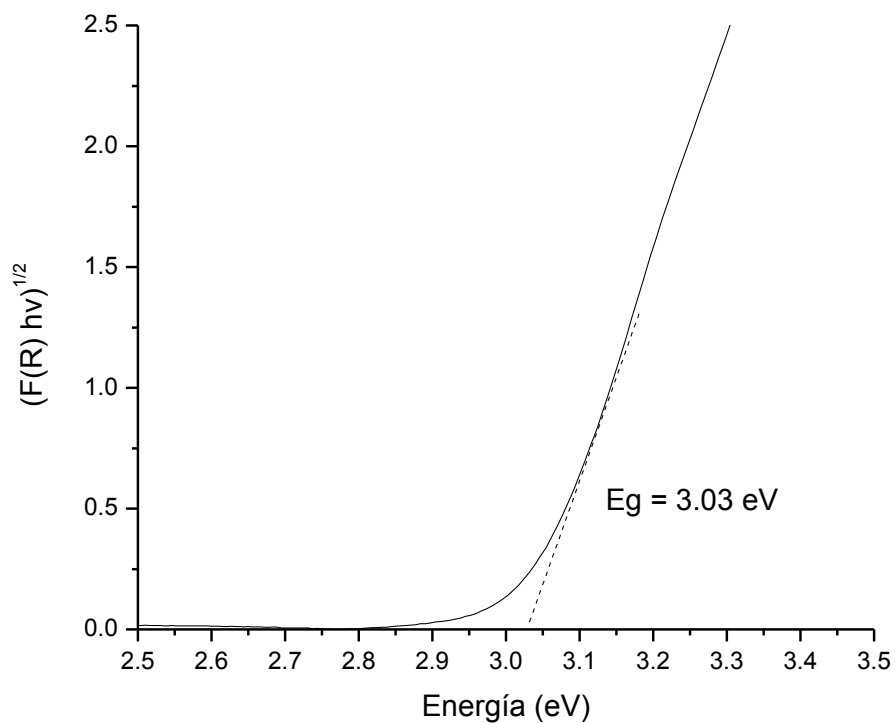


Figura 35. Curva Tauc de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.

III.2.2.2 Difracción de Rayos X

En la Figura 36 se presenta el patrón de difracción de rayos X obtenido de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.

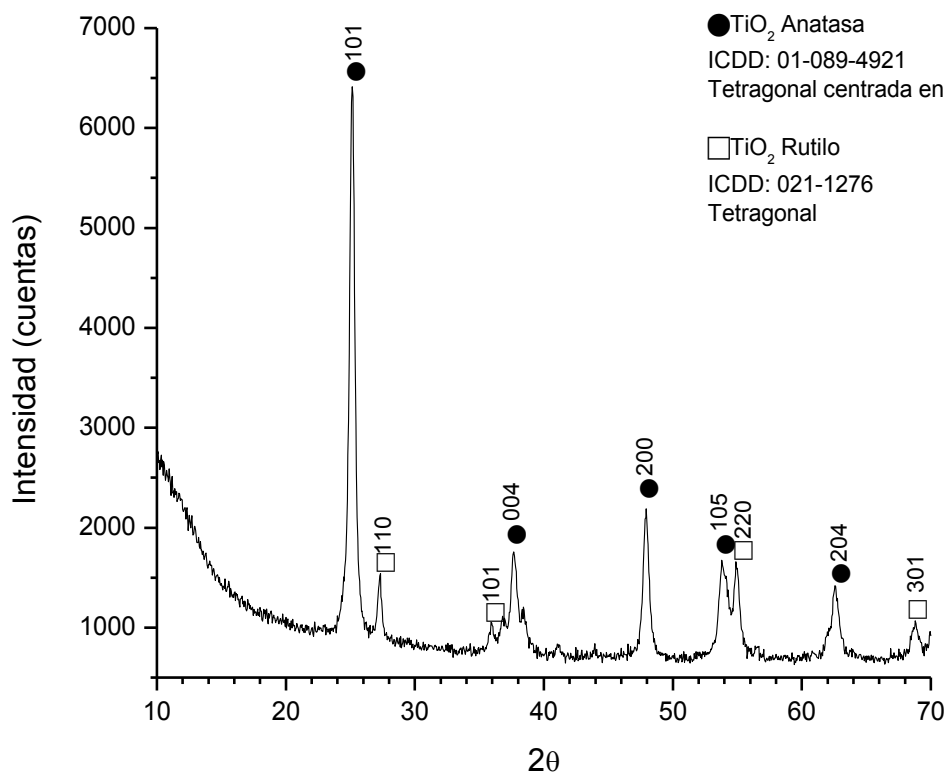


Figura 36. Patrón de difracción de rayos X de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.

Como se observa en la Figura 36, el patrón de difracción de rayos X de la película de TiO_2 preparada por screen printing presenta dos fases, siendo la fase mayoritaria la anatasa (ICDD: 01-089-4921) de estructura tetragonal centrada en el cuerpo, y la fase secundaria el rutilo (ICDD: 021-1276), de estructura tetragonal. Esto se debe a que las nanopartículas de TiO_2 (P25 Degussa) utilizadas para la preparación de la pasta que se empleó para el depósito de películas por screen printing, presentan en su composición las dos fases. En aplicaciones fotovoltaicas la fase anatasa es considerada la fase más activa del TiO_2 debido a que presenta mayor área superficial, gracias a su

orientación cristalográfica, y mayor energía de banda prohibida, además de que en la fase rutilo los procesos de recombinación ocurren con más frecuencia, los cuales son desfavorables para la eficiencia de las celdas solares^[97].

A partir de la ecuación de Scherrer se calculó el tamaño de cristal, obteniendo un valor de 28.8 nm para la fase anatasa y un valor de 112.6 nm para la fase rutilo.

Dado que en la ecuación de Scherrer el tamaño de cristal varía de manera inversamente proporcional al ancho del pico de difracción, y a que en el patrón de difracción de rayos X obtenido de la película de TiO₂ preparada por screen printing el ancho del pico principal del rutilo es bajo, se obtuvo un tamaño de cristal alto, mientras que para la anatasa, cuyo ancho de pico principal es mayor, se obtuvo un tamaño de cristal más bajo.

III.2.2.3 Microscopia Electrónica de Barrido

En la Figura 37 se presenta la imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la película de TiO₂ preparada por la técnica de screen printing.

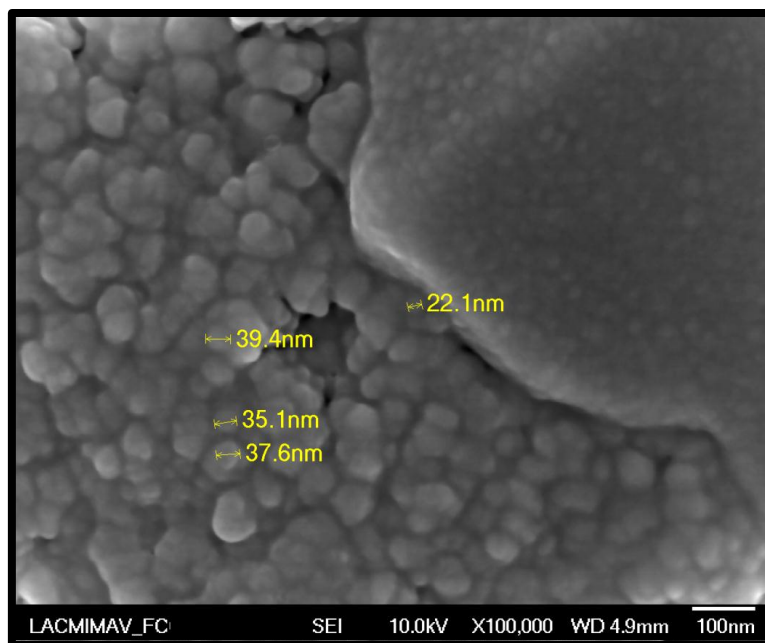


Figura 37. Imagen obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.

Como se observa en la Figura 37, la zona en donde se tomó la imagen presenta el depósito de una película rugosa constituida por partículas distribuidas de manera homogénea. Las partículas observadas presentan formas irregulares, con un tamaño promedio de alrededor de 37 nm.

III.2.2.4 Microscopia de Fuerza Atómica

En la Figura 38 se presenta el perfil de rugosidad obtenido por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de TiO_2 preparada por screen printing.

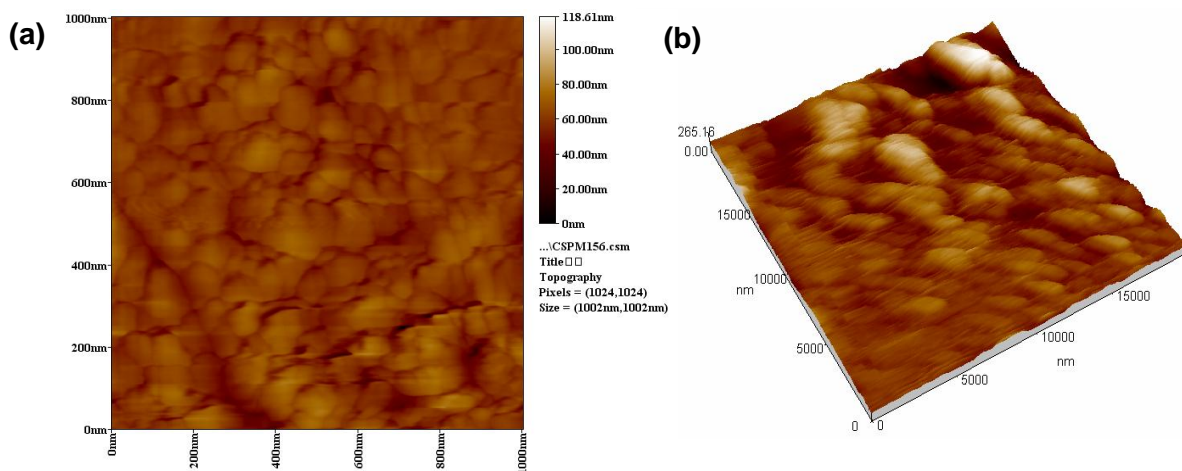


Figura 38. Imágenes obtenidas del análisis (a) seccional y (b) tridimensional por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de TiO_2 preparada por la técnica de screen printing.

Como se observa en la Figura 38, la rugosidad obtenida de la película de TiO_2 preparada por screen printing es de alrededor de 118.61 nm.

La imagen obtenida por Microscopia de Fuerza Atómica revela una superficie de morfología homogénea con partículas de tamaño uniforme.

III.2.3 Caracterización de la capa absorbente

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de la capa absorbente, la cual consiste en una película preparada con 5 ciclos de depósito del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ mediante el método silar, bajo las condiciones óptimas establecidas en la sección III.1.3.2 (concentración de la sal metálica: 0.3 M, tiempo de inmersión: 14 min, temperatura de calcinación: 150°C y tiempo de calcinación: 30 min).

III.2.3.1 Espectroscopia de Ultravioleta Visible

En la Figura 39 se presenta el espectro de absorción de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar sobre una capa rugosa de TiO_2 , que a su vez fue depositada sobre una capa densa de TiO_2 . Se muestran también los espectros de absorción de la capa densa y la capa rugosa de TiO_2 , con el propósito de apreciar el efecto en la absorción causado por el depósito de la capa de material absorbente.

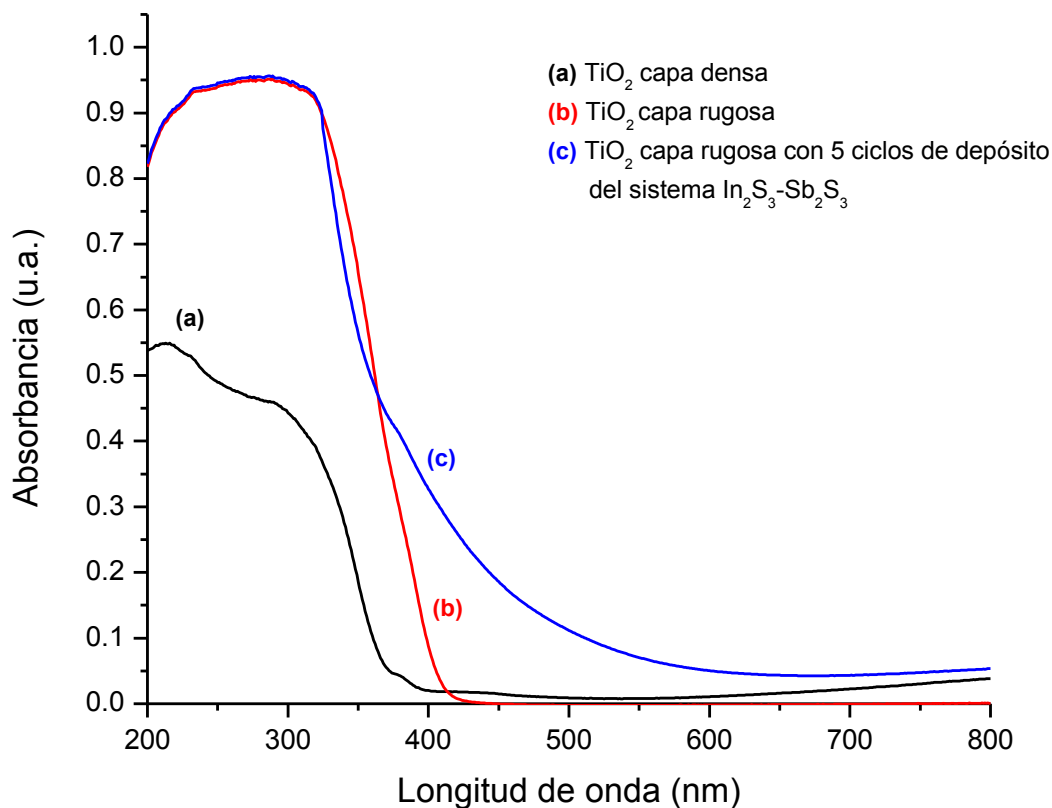


Figura 39. Espectro de absorción de la capa absorbente comparado con el de la capa densa de TiO_2 y la capa rugosa de TiO_2 .

Como se aprecia en la Figura 39, la absorbancia de la capa rugosa de TiO_2 se ve modificada tras el depósito de la capa de material absorbente, mostrando un incremento en la absorbancia en la región visible del espectro.

Estos resultados confirman que la capa absorbente depositada cumple con el propósito esperado, ya que aprovecha la región hacia el rojo del espectro visible, por parte del Sb_2S_3 , y la región hacia el azul por parte del In_2S_3 .

III.2.3.2 Difracción de Rayos X

En la Figura 40 se presenta el patrón de difracción de rayos X obtenido de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar sobre una capa densa y una capa rugosa de TiO_2

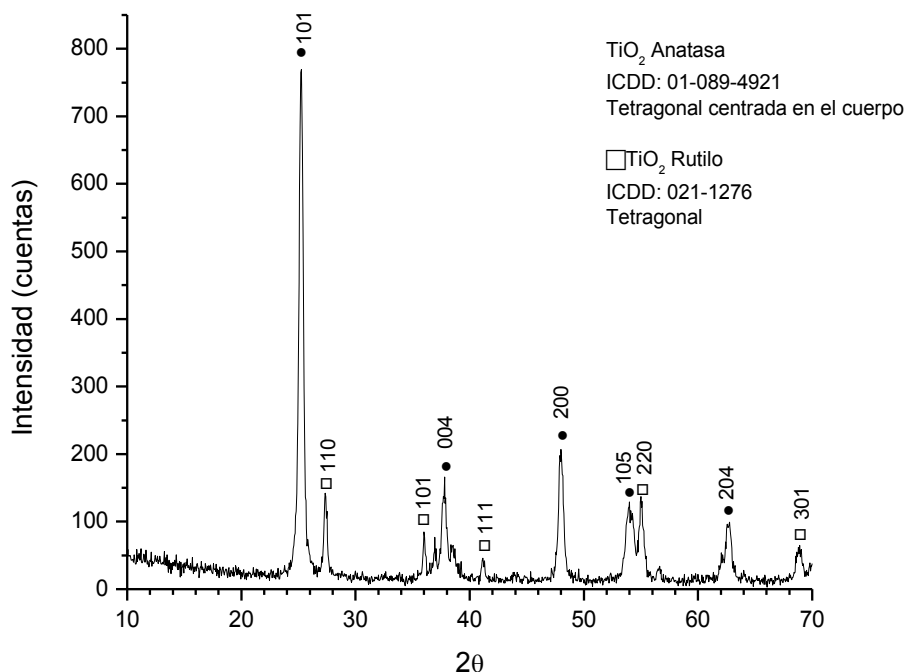


Figura 40. Patrón de difracción de rayos X de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar sobre una capa densa y una capa rugosa de TiO_2 .

Como se observa en la Figura 40, el patrón de difracción de rayos X de la de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar sobre una capa densa y una capa rugosa de TiO_2 , al igual que el patrón de difracción de la capa rugosa de TiO_2 , presenta dos fases, siendo la fase mayoritaria la anatasa (ICDD: 01-089-4921) de estructura tetragonal centrada

en el cuerpo, y la fase secundaria el rutilo (ICDD: 021-1276), de estructura tetragonal.

No se observaron picos de difracción diferentes a los correspondientes a las fases del TiO_2 , esto puede deberse a que el material de la capa absorbente tiene baja cristalinidad o bien, a que la cantidad de material depositado es demasiado poca para ser detectado por la técnica de difracción de rayos X. Para confirmar el depósito de la capa absorbente sobre la capa rugosa de TiO_2 se llevó a cabo un análisis por Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X, acoplada a la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido.

III.2.3.3 Microscopia Electrónica de Barrido

En la Figura 41(a) se presenta la imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar sobre una capa densa y una capa rugosa de TiO_2 y en la Figura 41(b) se presenta el mapeo elemental efectuado por Espectroscopia de Energía de Rayos X sobre la superficie de la película.

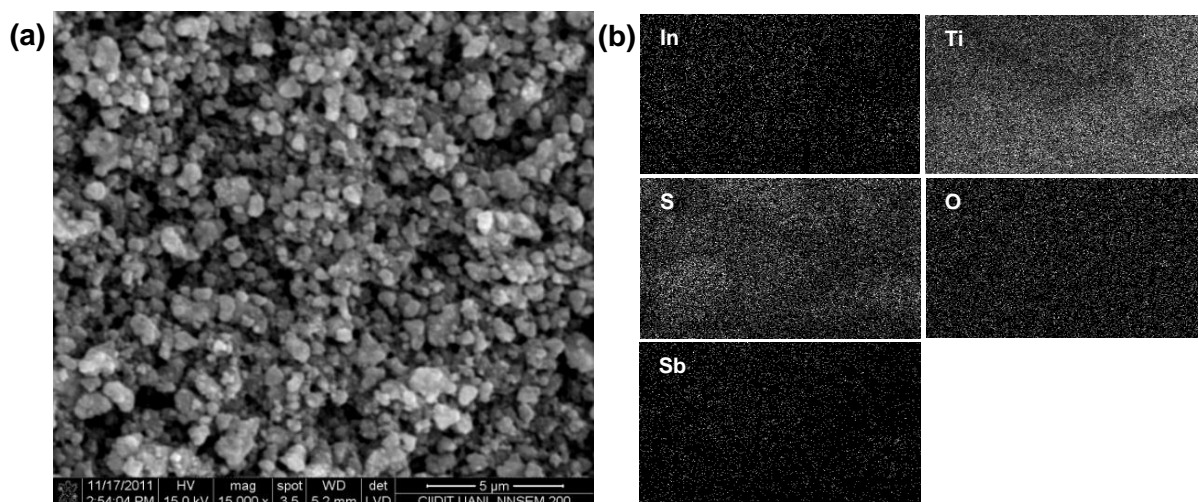


Figura 41. (a) Imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar sobre una capa densa y una capa rugosa de TiO_2 y (b) Mapeo elemental efectuado por Espectroscopia de Energía de Rayos X sobre la superficie de la película.

Como se observa en la Figura 41(a), la zona en donde se tomó la imagen presenta una superficie homogénea y rugosa formada por partículas de forma irregular con tamaño uniforme. Esta morfología coincide con la observada en la superficie de la capa rugosa de TiO_2 , de donde se puede asumir que el depósito de la capa absorbente no modificó la morfología del sustrato nanoestructurado.

El mapeo elemental mostrado en la Figura 41(b) nos confirma no sólo la presencia del material absorbente depositado ($\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$) sobre el TiO_2 , sino también la uniformidad del depósito.

III.2.3.4 Microscopia de Fuerza Atómica

En la Figura 42 se presenta el perfil de rugosidad obtenido por Microscopia de Fuerza Atómica de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar.

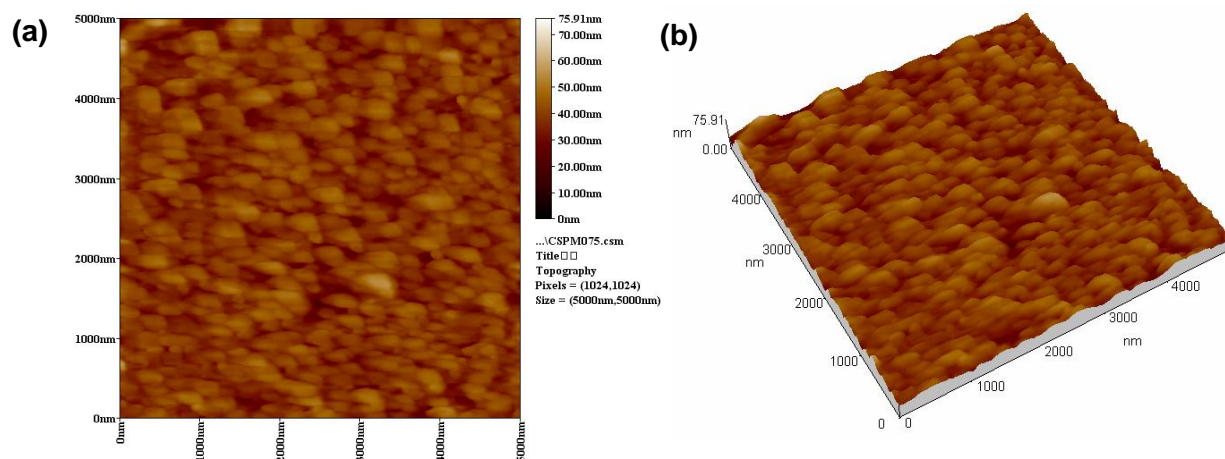


Figura 42. Imágenes obtenidas del análisis (a) seccional y (b) tridimensional por Microscopia de Fuerza Atómica de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar.

Como se observa en la Figura 42, la rugosidad obtenida de la capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar es de alrededor de 75.91 nm, lo que confirma la obtención de una película absorbente extremadamente delgada (< 100 nm).

La imagen obtenida por Microscopia de Fuerza Atómica reveló el depósito de una película con superficie homogénea y partículas de tamaño uniforme.

III.2.4 Caracterización de la capa de semiconductor tipo p

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación bajo las condiciones establecidas en la sección II.3.3 del Capítulo II.

III.2.4.1 Espectroscopia de Ultravioleta Visible

En la Figura 43 se presenta la gráfica de Kubelka Munk de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.

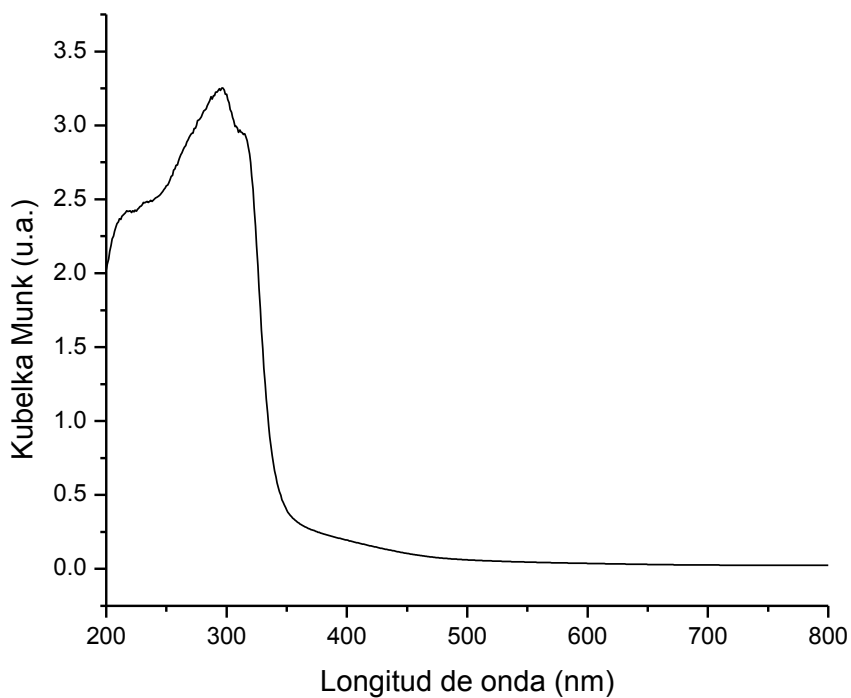


Figura 43. Gráfica de Kubelka Munk de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.

Como se observa en la Figura 43, el espectro de absorción obtenido corresponde con el esperado para el CuSCN, ya que este absorbe energía a longitudes de onda menores a 350 nm.

La energía de banda prohibida de la película preparada se calculó construyendo la curva Tauc (ver Figura 44), usando un valor de n igual a 2 debido a que el CuSCN presenta transiciones directas^[98]. Se obtuvo un valor de energía de banda prohibida de 3.67 eV, el cual se encuentra dentro del valor reportado para el CuSCN^[50].

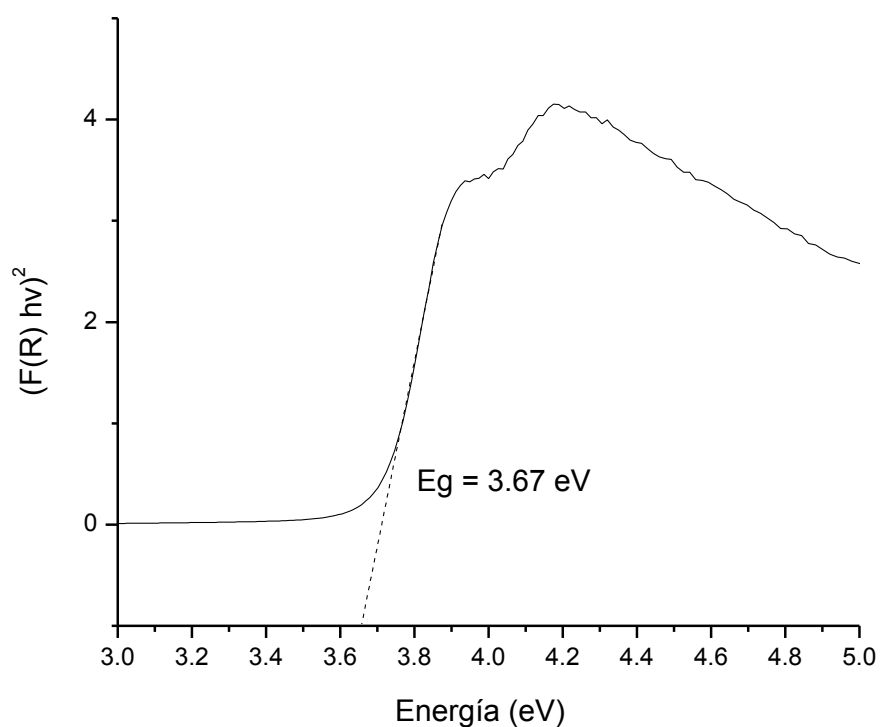


Figura 44. Curva Tauc de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.

III.2.4.2 Difracción de Rayos X

En la Figura 45 se presenta el patrón de difracción de rayos X obtenido de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.

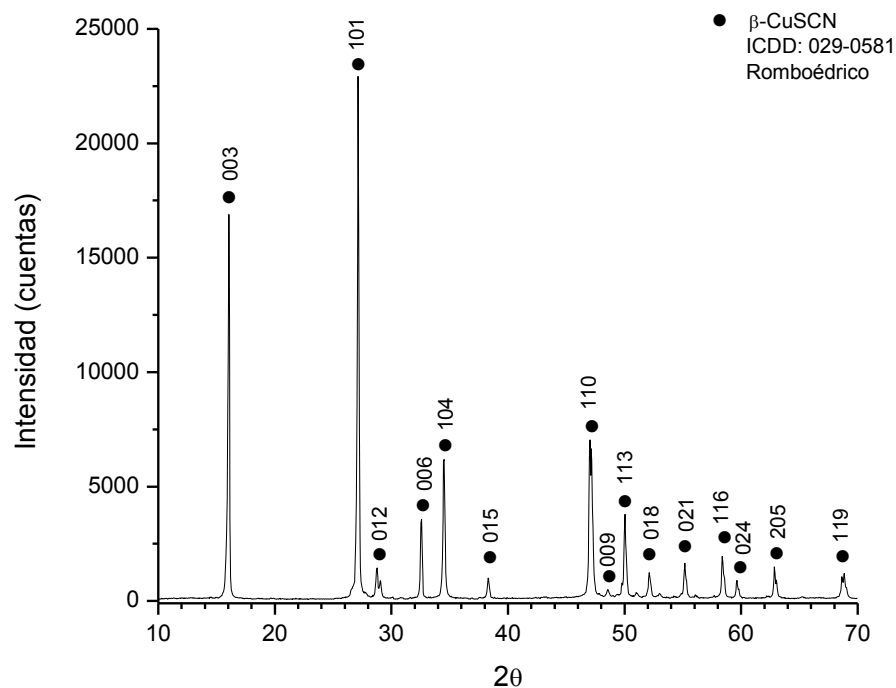


Figura 45. Patrón de difracción de rayos X de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.

Como se observa en la Figura 45, el patrón de difracción de rayos X de la capa de CuSCN depositada por la técnica de impregnación exhibe los picos de difracción característicos de la fase β-CuSCN (ICDD: 029-0581), de estructura romboédrica.

A partir de la ecuación de Scherrer se obtuvo el tamaño de cristal, obteniendo un valor de 396.8 nm, lo cual concuerda con la alta cristalinidad observada en los picos del patrón de difracción de rayos X.

III.2.4.3 Microscopia Electrónica de Barrido

En la Figura 46(a) se presenta la imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la película de CuSCN depositada sobre la capa de material absorbente mediante la técnica de impregnación y en la Figura 46(b) se presenta el mapeo elemental efectuado por Espectroscopia de Energía de Rayos X sobre la superficie de la película.

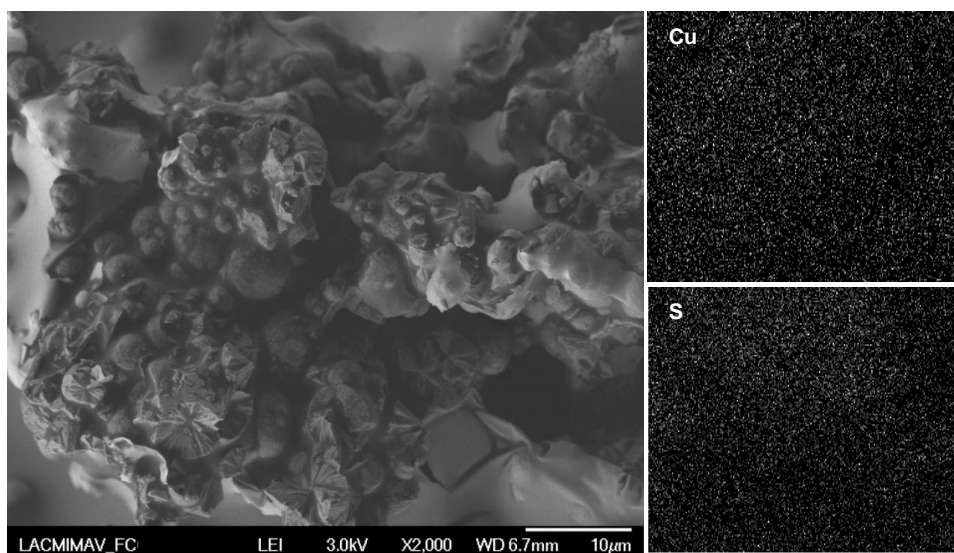


Figura 46. (a) Imagen obtenida por Microscopia Electrónica de Barrido de la capa de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación sobre la capa de material absorbente y (b) Mapeo elemental efectuado por Espectroscopia de Energía de Rayos X sobre la superficie de la película.

Como se observa en la Figura 46(a), la zona en donde se tomó la imagen presenta una superficie rugosa con partículas de forma irregular.

El mapeo elemental mostrado en la Figura 46(b) nos confirmó el depósito uniforme de una película de CuSCN sobre el material absorbente.

III.2.4.4 Microscopia de Fuerza Atómica

En la Figura 47 se presenta el perfil de rugosidad obtenido por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.

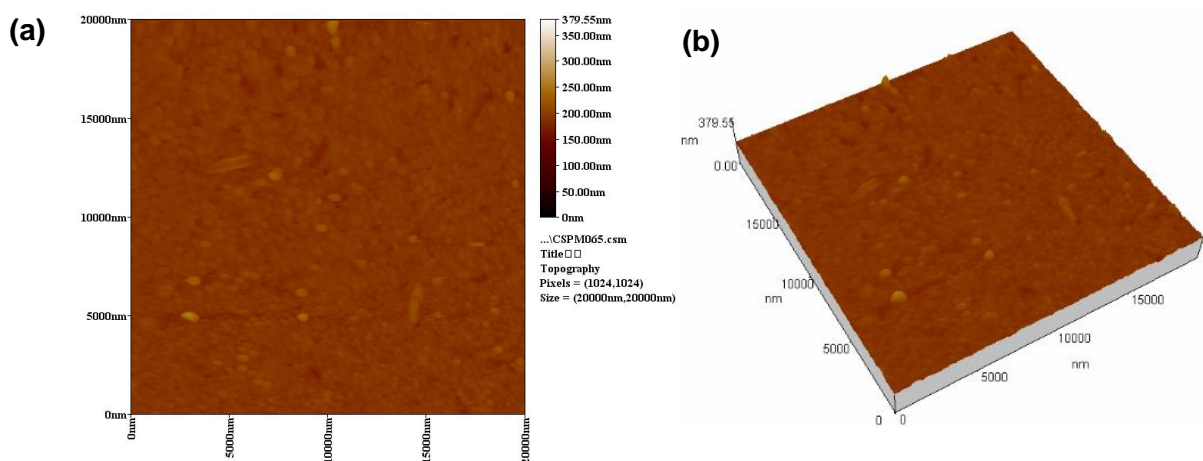


Figura 47. Imágenes obtenidas del análisis (a) seccional y (b) tridimensional por Microscopia de Fuerza Atómica de la película de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación.

Como se observa en la Figura 47, la rugosidad obtenida de la película de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación es de alrededor de 379.55 nm.

La imagen obtenida por Microscopia de Fuerza Atómica reveló una superficie de morfología homogénea con partículas de tamaño uniforme.

III.3 Caracterización de la celda solar ETA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de la celda solar ETA construida mediante la obtención de la curva de corriente-potencial bajo las condiciones descritas en la sección II.4.2.1 del Capítulo 2.

III.3.1 Curva de corriente-potencial (I-V)

En la Figura 48 se presenta la curva de corriente-potencial obtenida al iluminar la celda solar ETA $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3/\text{CuSCN}$ con una lámpara de xenón a 500 W/m^2 de iluminación (AM 1.5 y $T = 25^\circ\text{C}$).

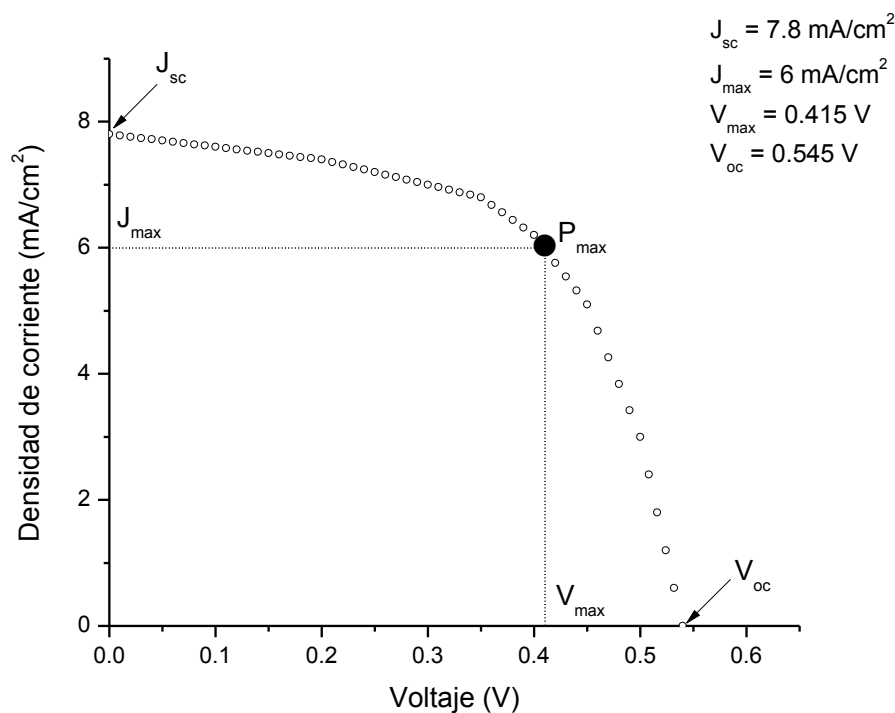


Figura 48. Curva corriente-potencial (I-V) obtenida al iluminar la celda solar ETA $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3/\text{CuSCN}$ con una lámpara de xenón a 500 W/m^2 de iluminación (AM 1.5 y $T = 25^\circ\text{C}$).

A partir de la curva de corriente-potencial (I-V) mostrada en la Figura 48 se obtuvieron los valores de densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}), densidad de corriente máxima generada (J_{max}), voltaje máximo generado (V_{max}) y voltaje a circuito abierto (V_{oc}).

La corriente de corto circuito (I_{sc}) y la corriente máxima generada (I_{max}) se obtuvieron multiplicando la densidad de corriente por el área de la celda solar ETA como sigue:

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A} \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$I_{sc} = J_{sc} \times A$$

$$I_{sc} = 7.8 \text{ mA/cm}^2 \times 1.5 \text{ cm}^2$$

$$I_{sc} = 0.0117 \text{ A}$$

$$J_{max} = \frac{I_{max}}{A} \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$I_{max} = J_{max} \times A$$

$$I_{max} = 6 \text{ mA/cm}^2 \times 1.5 \text{ cm}^2$$

$$I_{max} = 0.009 \text{ A}$$

La potencia máxima de la celda (P_{max}) se calculó a partir de la Ecuación

4:

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$P_{max} = (0.009 \text{ A}) \times (0.415 \text{ V})$$

$$P_{max} = 0.00373 \text{ W}$$

El factor de llenado de la celda (FF) se calculó a partir de la Ecuación 6:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$FF = 0.00373 \text{ W} / (0.0117 \text{ A} \times 0.545 \text{ V})$$

$$FF = 0.00373 \text{ W} / 0.00638 \text{ W}$$

$$FF = 0.58$$

Finalmente, la eficiencia de la celda solar (η) se calculó a partir de la Ecuación 5:

$$\eta = \frac{P_{max}}{ExA_c} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$\eta = 0.00373 \text{ W} / (500 \text{ W/m}^2 \times 0.00015 \text{ m}^2)$$

$$\eta = 0.00373 \text{ W} / 0.075 \text{ W}$$

$$\eta = 0.0497$$

$$\% \eta = (0.0497) \times 100$$

$$\% \eta = 4.9$$

En la Tabla XIII se resumen los parámetros obtenidos de la caracterización de la celda solar ETA.

Tabla XIII. Resumen de los parámetros obtenidos de la caracterización de la celda solar ETA $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3/\text{CuSCN}$.

Conductor de electrones	TiO_2
Conductor de huecos	CuSCN
Material absorbente	$\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$
Corriente de corto circuito (I_{sc})	0.0117 A
Voltaje de circuito abierto (V_{oc})	0.545 V
Corriente máxima (I_{max})	0.009 A
Voltaje máximo (V_{max})	0.415 V
Potencia máxima (P_{max})	0.00373 W
Factor de llenado (FF)	0.58
Eficiencia (η)	4.9 %

En la Tabla XIV se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de la celda solar ETA construida en este trabajo comparados directamente con los de las celdas solares ETA reportadas que utilizan como capa n el TiO_2 , como capa p el CuSCN y como material absorbente el In_2S_3 y Sb_2S_3 por separado.

Tabla XIV. Comparación de los parámetros obtenidos en celdas solares ETA relacionadas con este trabajo.

Capa n	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂
Capa absorbente	In ₂ S ₃ -Sb ₂ S ₃	In ₂ S ₃	Sb ₂ S ₃
Espesor de la capa absorbente	75.91 nm	~100 nm	100-200 nm
Capa p	CuSCN	CuSCN	CuSCN
I_{sc} (mA/cm²)	11.7	8	11.6
V_{oc} (V)	0.545	0.475	0.560
Irradiancia	500 W/m ²	1000 W/m ²	1000 W/m ²
FF	0.58	0.58	0.58
% η	4.9	2.3	3.7
Autor	Este trabajo	Dittrich	Larramona
Año		2009	2010
Referencia		72	77

*El espesor de la capa absorbente en el trabajo de Dittrich es aproximado, dado que en la referencia se reportan los valores exactos de los espesores de celdas preparadas con diferente número de ciclos de depósito, y de la mejor celda solar preparada, de la cual se reportan los parámetros de celda y su eficiencia, no se reporta el espesor de la capa absorbente.

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla XIV, los valores de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto se asemejan más a los arrojados por la celda que emplea como material absorbente el Sb_2S_3 , sin embargo, son ligeramente mayores a los reportados por los dos sistemas por separado.

El incremento en la corriente de corto circuito encontrado en este trabajo puede deberse entre otras cosas, al área efectiva empleada de la celda solar, ya que en este trabajo fue de 1.5 cm^2 , mientras que en el de Larramona usaron un área efectiva de 0.54 cm^2 y en el trabajo de Dittrich solo reportan la construcción de celdas solares de área pequeña. El valor de la corriente de corto circuito también se ve afectado por las propiedades ópticas de la celda, así como por la colección de cargas en la misma.

Respecto al voltaje de circuito abierto, éste se ve afectado por el espesor de la capa absorbente, la movilidad de los portadores de carga, así como por los procesos de fabricación empleados.

El incremento en la eficiencia total de la celda encontrada en este trabajo puede deberse, además del incremento en la absorción de la celda solar al aprovechar los rangos de absorción óptica de los dos compuestos, a una reducción en el espesor de la capa absorbente, ya que es bien sabido que la eficiencia de las celdas solares ETA incrementa conforme el espesor de la capa absorbente disminuye^[73].

Finalmente, se recomienda medir la respuesta de la celda usando iluminación con una lámpara que alcance un nivel de irradiancia de 1000 W/m^2 , con el objetivo de obtener resultados más comparables.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos de este trabajo de investigación se derivan las siguientes conclusiones:

Se encontraron las condiciones óptimas para el depósito de una capa densa de TiO_2 por la técnica de spin coating (velocidad de depósito: 1000 rpm, tiempo de rotación: 10 s, cantidad de solución de precursor: 1mL, perfil de calcinación: 450°C-60 min y relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina: 1:2) y se estudió la influencia de cada factor sobre la absorbancia de las películas, encontrando que ésta depende significativamente sólo de la relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina.

En la preparación de una capa rugosa de TiO_2 por la técnica de screen printing, se estudió el efecto de la viscosidad de la pasta de TiO_2 sobre el aspecto visual de películas, encontrando que una pasta con una viscosidad de 100,000 mPa•s es la más indicada para el depósito de películas uniformes por ésta técnica. También se evaluó el efecto de la temperatura (400°C y 450°C) y

el tiempo de calcinación (30 min y 60 min) sobre la morfología de las películas, encontrando que tiempos mayores de calcinación conducen a la obtención de granos de mayor tamaño y a la formación de aglomerados. Con respecto a la temperatura de calcinación, se obtuvo una mayor rugosidad a 450°C, por lo que se definió que el perfil de calcinación más adecuado para la obtención de películas rugosas de TiO_2 depositadas por la técnica de screen printing es de 450°C por 30 minutos.

Se estudió el efecto del número de ciclos y de las condiciones de depósito sobre la absorbancia de películas de material absorbente depositadas por el método silar. Del estudio del efecto del número de ciclos se estableció que un número de ciclos de depósito de 5 nos arroja la mejor relación de absorbancia:espesor. A través de la evaluación de las condiciones de depósito se encontraron las condiciones óptimas para el depósito del sistema In_2S_3 - Sb_2S_3 mediante el método silar (concentración de la sal metálica: 0.3 M, tiempo de inmersión: 14 min, temperatura de calcinación: 150°C y tiempo de calcinación: 30 min) y se estudió la influencia de cada factor sobre la absorbancia de las películas, encontrando que ésta depende significativamente de la concentración de la sal metálica, mientras que el resto de los factores no tienen una influencia significativa.

Se caracterizaron los materiales empleados en la construcción de la celda solar ETA:

- La película densa de TiO_2 preparada por spin coating arrojó una energía de banda prohibida de 3.28 eV, la presencia de la fase anatasa, una

morfología homogénea con un tamaño de partícula de alrededor de 20 nm y una rugosidad de 34.82 nm.

- La película rugosa de TiO_2 preparada por screen printing arrojó una energía de banda prohibida de 3.03 eV, la presencia de dos fases, siendo la fase principal anatasa y la fase secundaria rutilo, una morfología homogénea con un tamaño de partícula de alrededor de 37 nm y una rugosidad de 118.61 nm.
- La capa absorbente del sistema $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ depositada mediante el método silar mostró un espectro de absorción que aprovecha la región hacia el azul y hacia el rojo del espectro visible. El depósito de la capa absorbente sobre la capa rugosa de TiO_2 no modificó su morfología. La rugosidad obtenida de la capa absorbente fue de 75.91 nm, lo que confirmó el depósito de una capa extremadamente delgada. No se logró la caracterización estructural por Difracción de Rayos X debido a su baja cristalinidad, o bien, a la pequeña cantidad de material absorbente depositado, sin embargo, a través del análisis por Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X se confirmó la presencia del material absorbente y su depósito uniforme sobre la superficie de la capa rugosa de TiO_2 .
- La película de CuSCN depositada mediante la técnica de impregnación, mostró una energía de banda prohibida de 3.67 eV, la presencia de la fase $\beta\text{-CuSCN}$, una morfología homogénea y una rugosidad de 379.55

nm. Su depósito uniforme sobre la capa absorbente se confirmó a través de un mapeo por Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X.

A partir de los materiales preparados en este trabajo se logró la construcción de la celda solar ETA $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3/\text{CuSCN}$, cuya caracterización se llevó a cabo a través de la curva de corriente-potencial. Los parámetros obtenidos de la celda fueron los siguientes: I_{sc} : 0.0117 A, V_{oc} : 0.545 V, I_{max} : 0.009 A, V_{max} : 0.415 V, P_{max} : 0.00373 W y FF : 0.58. La eficiencia total calculada de la celda fue de 4.9%, la cual es ligeramente mayor a la reportada por las celdas solares ETA que utilizan la misma capa n y p, y como material absorbente los sulfuros de indio y antimonio por separado. Este incremento en la eficiencia puede adjudicarse a una mayor absorción de la celda solar al aprovechar los rangos de absorción óptica de los dos compuestos y a una reducción en el espesor de la capa absorbente.

De manera global, se puede concluir que se logró la construcción de una celda solar ETA de eficiencia competitiva, la cual emplea un diseño y un sistema de absorción novedoso preparado a través de métodos sencillos y de bajo costo, partiendo de materiales que son amigables con el medio ambiente.

CAPÍTULO V

RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO

Del presente trabajo de investigación se derivan las siguientes recomendaciones para trabajo futuro:

- Se recomienda evaluar la eficiencia de la celda solar ETA $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3/\text{CuSCN}$ empleando una irradiancia de 1000 W/m^2 .
- Se recomienda preparar estructuras que ofrezcan una mayor área superficial y rugosidad, por ejemplo, nanobastones o nanofibras, para su uso como sustrato nanoestructurado, con el fin de que ofrezcan una mayor área superficial sobre la cual depositar la capa de material absorbente y favorezcan el fenómeno de light trapping o retención de la luz.
- Se recomienda evaluar el desempeño de una celda solar ETA que emplee el mismo material absorbente ($\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$) pero distinto semiconductor tipo n, por ejemplo, el ZnO, y otro semiconductor tipo p, tal como el PEDOT.

- Se recomienda la evaluación de otros sulfuros como capa absorbente, tal como el Bi_2S_3 , el cual posee una energía de banda prohibida de 1.74 eV y presenta un alto coeficiente de absorción.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

1. "Energy Outlook 2011 Early Release Overview" *U.S. Energy Information Administration Annual*, **(2011)**.
2. R Barsky and L Kilian "Oil and the Macroeconomy Since the 1970's" *Discussion Paper No. 4496* 1001: 48109-1220, **(2010)**.
3. J Wiles "PV Basics Affect the Code" *Home Power* 101: 112-114, **(2004)**.
4. R Briggs, R Carlisle and B Poppe "Solar Physics and Terrestrial Effects" *Space Environment Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration*, Chapter 2: 7-16, **(1994)**.
5. G Kopp and J Lean "A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance" *Geophysical Research Letters*, 38(1), 1-7, **(2011)**.
6. L Lakatos, G Hevessy and J Kovacs "Advantages and Disadvantages of Solar Energy and Wind-Power Utilization" *The Journal of New Paradigm Research*, 67(6): 395-408, **(2011)**.

7. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía “Energía Solar” Disponible en: http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/que_es_la_energia_solar. Fecha de consulta: 05-09-2014.
8. J Méndez Muñoz y R Cuervo García “Energía Solar Térmica” Fundación Confemetal, 1(1):37, **(2010)**.
9. “Trends in Photovoltaic Applications” Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2007, *Photovoltaic Power Systems Program*. Report IEA-PVPS T1-17, **(2008)**.
10. S McKagan, W Handley, K Perkins and C.E. Wieman “A research-based curriculum for teaching the Photoelectric Effect” *American Journal of Physics*, 77(1): 87-94, **(2010)**.
11. M Green “Solar cells-Operating Principles, Technology and System Applications” Published by The University of New South Wales Australia, **(1996)**.
12. M Paulescu “Weather Modeling and Forecasting of PV System Operations” *Springer Verlag* (1), **(2013)**.
13. GL Pearson and WH Brattain “History of Semiconductor Research”, 43:1794-1806, **(1955)**.
14. L Gutiérrez Gómez y L Rodríguez Martínez “Reutilización a escala micrométrica de la energía solar y mecánica de vibración de nuestro entorno y su influencia en el desarrollo industrial” *Universidad de Castillas La Mancha*, 2-4, **(2008)**.

15. S Srinivasan "The solar photovoltaic industry: a life cycle analysis" *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11(1):133-147 **(2007)**.
16. W Shepperd and L Richards "Energía Solar Fotovoltaica para Proyectos de Desarrollo" *Reporte SAND93-1642*, Sandia National Laboratories, Albuquerque NM, **(1994)**.
17. A Pizarro Maure "Evaluación de Proyecto de Viviendas Sustentables para el Norte de Chile" *Escuela de Economía y Administración, Universidad de Chile*, 93, **(2013)**.
18. V Risser "Stand-Alone Photovoltaics Systems: A Handbook Recommended Design Practices" *Sandia National Laboratories*, Albuquerque, NM, **(1995)**.
19. "Diodos y circuitos rectificadores" *Publicado por la Universidad Nacional Autónoma de Colombia*, **(2002)**.
20. E Lorenzo "Electricidad Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos" *Instituto de Energía Solar*, Universidad Politécnica de Madrid, Primera Edición, **(1994)**.
21. D Neamen "An Introduction to Semiconductor Devices" First Edition, McGraw-Hill, **(2006)**.
22. J Barrow "Natural Units Before Planck" *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 24, **(1983)**.
23. M Green "Solar Cells. Operating Principles, Technology and System Applications" *University of New South Wales*, **(1998)**.

24. Z Dilli “Intrinsic and Extrinsic Semiconductors, Fermi-Dirac Distribution Function, the Fermi level and carrier concentrations” *ENEE* 313:1-8, **(2009)**.
25. S Sze “Physics of Semiconductor Devices” Wiley-Interscience, New York, **(1969)**.
26. P Wurfel “Physics of Solar Cells” Wiley VCH, **(2005)**.
27. R Swanson “Photovoltaics Power Up” *Science*, 324(5929): 891-2, **(2009)**.
28. R Schropp, R Carius & G Beaucarne “Amorphous silicon, microcrystalline silicon, and thin-film polycrystalline silicon solar cells” *MRS Bulletin*, 32(3):219-224 **(2007)**.
29. A Badawy “A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots” *Journal of Advanced Research*, **(2013)**.
30. V Fthenakis and H Kim “CdTe photovoltaics: life cycle environmental profile and comparisons” *Thin Solid Films*, 515, 5961-5963, **(2007)**.
31. Y Othake, T Okamoto, A Yamada, et al. “Improved performance of Cu(InGa)Se₂ thin film solar cells using evaporated Cd-free buffer layers” *Solar energy materials and solar cells*, 49(1-4):269-275 **(1997)**.
32. A Goetzberger, D Hebling and H Schock “Photovoltaic materials, history, status and outlook” *Materials Science and Engineering*, R 40:1-46 **(2003)**.

33. M Green and AH Baillie “Forthy three percent composite split-spectrum concentrator solar cell efficiency” *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 18:42-47 **(2010)**.
34. B Oregan, M Grätzel “A low cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films” *Nature*, 353, 737-740 **(1991)**.
35. S Caramori, V Cristino and A Carlo “New Components for Dye-Sensitized Solar Cells” *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2010, **(2010)**.
36. M Khan, S Ansari and M Cho “Band gap engineered TiO₂ nanoparticles for visible light induced photoelectrochemical and photocatalytic studies” *Journal of Materials Chemistry A*, 2, 637-644, **(2014)**.
37. S Nakade, T Kanzaki, S Kambe, Y Wada & S Yanagida “Investigation of Cation-Induced Degradation of Dye-Sensitized Solar Cells for a New Strategy to Long-Term Stability” *Langmuir*, 21(24):11414-11417 **(2005)**.
38. AJ Shields “Semiconductor quantum dots as light sources” *Nature Photonics*, 1(4): 215-223 **(2007)**.
39. Y Tachibana, HY Akiyama, Y Ohtsuka, T Torimoto and S Kuwabata “CdS quantum dots sensitized TiO₂ sandwich type photoelectrochemical solar cells” *Chemistry Letters*, 36(1):88-89 **(2007)**.
40. I Robel, M Kuno & PV Kamat “Size-dependent electron injection from excited CdSe quantum dots into TiO₂ nanoparticles” *Journal of the American Chemical Society*, 129 (14): 4136-4137 **(2007)**. D Liu & PV Kamat “Photoelectrochemical behavior of thin cadmium selenide and coupled

- titania/cadmium selenide semiconductor films” *Journal of Physics & Chemistry*, 97(41):10769-10773 (**1993**).
41. JL Blackburn, DC Selmarten, RJ Ellingson, M Jones, OI Micic & AJ Nozik “Electron and Hole Transfer from Indium Phosphide Quantum Dots” *Journal of Physical Chemistry B*, 109(7):2625-2631 (**2005**).
42. P Yu, K Zhu, AG Norman, S Ferrere, AJ. Frank & AJ Nozik “Nanocrystalline TiO₂ Solar Cells Sensitized with InAs Quantum Dots” *Journal of Physical Chemistry B*, 110(50):25451-25454 (**2006**).
43. P Wang, L Wang, B Ma, B Li & Y Qiu “TiO₂ Surface Modification and Characterization with Nanosized PbS in Dye-Sensitized Solar Cells” *Journal of Physical Chemistry B*, 110(29):14406-14409 (**2006**).
44. LM Peter, KGU Wijayantha, DJ Riley & J Waggett “Band-Edge Tuning in Self-Assembled Layers of Bi₂S₃ Nanoparticles Used To Photosensitize Nanocrystalline TiO₂” *Journal of Physical Chemistry B*, 107(33): 8378-8381 (**2003**).
45. K Ernst, A Belaidi and R Könenkamp “Solar cell with extremely thin absorber on highly structured substrate” *Semiconductor Science Technology*, 18, (**2003**).
46. J Briscoe “Extremely thin absorber solar cells based on nanostructured semiconductors” *Materials Science and Technology*, 27: 1741-1756, (**2011**).

47. P Boix, K Nonomura and N Mathews “Current progress and future perspectives for organic/inorganic perovskite solar cells” *Materials Today*, 17(1): 16-23, **(2014)**.
48. H Deckman, C Wronski, H Witzke and E Yablonovitch “Cd-Se Sensitized p-CuSCN/Nanowire n-ZnO Heterojunctions” *Applied Physics Letters*, 42(968), **(1983)**.
49. R Könenkamp, L Dloczik, K Ernst and C Olesch “Nano-structures for solar cells with extremely thin absorbers” *Physica E*, 14(219), **(2002)**.
50. I Kaiser, K Ernst, C Fischer, R Könenkamp, C Rost, I Sieber & M Lux Steiner “The eta-solar cell with CuInS_2 : A photovoltaic cell concept using an extremely thin absorber (eta)” *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 3(67)1-4:89-96 **(2001)**.
51. K Ernst, I Sieber, M Neumann-Spallart, M Lux Steiner and R Könenkamp “Characterization of II-VI compounds on porous substrates” *Thin Solid films* 361-362, 213-217, **(2000)**.
52. K Ernst, R Engelhardt, K Ellmer, C Kelch, HJ Muffler, M Lux-Steiner & R Könenkamp “Contacts to a solar cell with extremely thin CdTe absorber” *Journal of Thin Solid Films*, 387(1,2):26-28 **(2001)**.
53. T Senthil, N Muthukumarasamy and N Agilan “Structural investigation on nanocrystalline TiO_2 thin films prepared by sol-gel spin coating technique” *Materials Science Engineering*, 11(6): 831-833, **(2009)**.

54. Y Hsuan Fu and W Chang Wen "Photocatalysis and characterization of the gel-derived TiO_2 and P- TiO_2 transparent thin films" *Thin Solids Films*, 519(19):6453-6458, **(2011)**.
55. T Senthil, N Muthukumarasamy and N Agilan "Structural investigation on nanocrystalline TiO_2 thin films prepared by sol-gel spin coating technique" *Materials Science Engineering*, 11(6): 831-833, **(2009)**.
56. W Sheng Hung, W Kuo Hua, D Yong Ming and J Jih Mirn "Water effect on the surface morphology of TiO_2 thin film modified by polyethylene glycol" *Applied Surface Sciences*, 264(1): 470-475, **(2013)**.
57. S Ito, P Chen, P Comte, M Khaja, P Liska, P Pechy and M Grätzel "Fabrication of screen printing pastes from TiO_2 powders for dye sensitized solar cells" *Photovoltaics Researchs and Applications*, 15(7): 603-612, **(2007)**.
58. Y Zhang, X Zhibin and J Wang "Precuring of supramolecular-templated mesoporous TiO_2 films for dye sensitized solar cells" *Thin Solid Films*, 518(24): 34-37, **(2010)**.
59. R Könenkamp, K Ernst, C Fisher, M Lux Steiner and C Rost "Semiconductor Growth and Junction Formation within Nanoporous Oxides" *Physica Status Solidi (A)*, 182(151), **(2000)**.
60. C Lévy-Clément, A Katty, S Bastide, F Zenia, I Mora and V Muñoz San-José "A new CdTe/ZnO columnar composite film for eta-solar cells" *Physica E*, 14(229), **(2002)**.

61. R Salazar, A Delamoreanu, C Lévy-Clément and V Ivanova "ZnO/CdTe and ZnO/CdS Core-shell nanowire arrays for extremely thin absorber solar cells" *European Materials Research Society Conference, Advanced Inorganic Materials and Concepts for Photovoltaics* 10, 122-127, (2011).
62. R Könenkamp, P Hoyer & A Wahi "Heterojunctions and devices of colloidal semiconductor films and quantum dots" *Journal of Applied Physics*, 79(9):7029-7035 (1996).
63. S Siebentritt, K Ernst, Ch Fischer, R Könenkamp, M Lux-Steiner "CdTe and CdS as extremely thin absorber materials in an eta solar cell" *Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, p. 1823. Barcelona, (1997).
64. K Tennakone, G Kumara, I Kottegoda, V Perera & G Aponso "Nanoporous n-TiO₂/selenium/p-CuSCN photovoltaic cell" *Journal of Applied Physics D*, 31:2326-2330, (1998).
65. R Tena-Zaera, A Katty, S Bastide, C Lévy-Clément, B O'Regan & V Muñoz-Sanjosé "ZnO/CdTe/CuSCN, a promising heterostructure to act as inorganic eta-solar cell" *Journal of Thin Solid Films*, 483(1-2):372-377 (2005).
66. R Tena-Zaera, MA Ryan, Ryan, A Katty, G Hodes, S Bastide, Bastide & C Lévy-Clément "Fabrication and characterization of ZnO nanowires/CdSe /CuSCN eta-solar cell" *Comptes Rendus Chimie*, 9(5-6):717-729 (2006).
67. A) R Bayon, R Musembi, A Belaidi, M Baer, T Guminskaya, M Lux-Steiner & T Dittrich "Highly structured TiO₂/In(OH)_xS_y/PbS/PEDOT:PSS for photovoltaic applications" *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 89(1):13-25 (2005).

68. G Larramona, C Chone, A Jacob, D Sakakura, B Delatouche, D Peré, X Cieren, M Nagino & R Bayón “Nanostructured Photovoltaic Cell of the Type Titanium Dioxide, Cadmium Sulfide Thin Coating, and Copper Thiocyanate Showing High Quantum Efficiency” *Chemistry of Materials*, 18:1688-1696 (2006).
69. M Biancardo & FC Krebs “Microstructured extremely thin absorber solar cells” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91(18):1755-1762 (2007).
70. S Gavrilov, T Dittrich, B Lim, A Belaidi & M Lux-Steiner “Ultra-thin charge selective systems based on MeSxHy (Me = In, Cu, Pb)” *Thin Solid Films*, 516(20):7051-7054 (2008).
71. A Belaidi, T Dittrich, D Kieven, J Tornow, K Schwarzburg & M Lux-Steiner “Influence of the local absorber layer thickness on the performance of ZnO nanorod solar cells” *Physica Status Solidi RRL: Rapid Research Letters*, 2(4):172-174 (2008).
72. C Herzog, A Belaidi, A Ogacho & T Dittrich “Inorganic solid state solar cell with ultra-thin nanocomposite absorber based on nanoporous TiO₂ and In₂S₃” *Energy & Environmental Science*, 2(9):962-964 (2009).
73. S Gavrilov, A Dronov, V Shevyakov, A Belov & E Poltoratskii “Ways to Increase the Efficiency of Solar Cells with Extremely Thin Absorption Layers” *Nanotechnologies in Russia*, 4(3–4):237–243 (2009).
74. Y Itzhaik, O Niitsoo, M Page & G Hodes “Sb₂S₃-Sensitized Nanoporous TiO₂ Solar Cells” *Journal of Physical Chemistry C*, 113(11):4254-4256 (2009).

75. M Page, O Niitsoo, Y Itzhaik, D Cahen & G Hodes "Copper sulfide as a light absorber in wet-chemical synthesized extremely thin absorber (ETA) solar cells" *Energy & Environmental Science*, 2(2):220-223 (2009).
76. E Edri, E Rabinovich, O Niitsoo, H Cohen, T Bendikov & G Hodes "Uniform Coating of Light-Absorbing Semiconductors by Chemical Bath Deposition on Sulfide-Treated ZnO Nanorods" *Journal of Physical Chemistry C*, 114: 13092–13097 (2010).
77. S Nezu, G Larramona, C Chone, A Jacob, B Delatouche, D Pere & C Moisan "Light Soaking and Gas Effect on Nanocrystalline TiO_2 / Sb_2S_3 /CuSCN Photovoltaic Cells following Extremely Thin Absorber Concept" *Journal of Physical Chemistry C*, 114(4):6854-6859 (2010).
78. M Krunk, E Karber, A Katerski, K Otto, I Acik, T Dedova & A Mere "Extremely thin absorber layer solar cells on zinc oxide nanorods by chemical spray" *Journal of Solar Energy Materials And Solar Cells*, 94(7):1191-1195 (2010).
79. R Dharmadasa, KGU Wijayantha & AA Tahir "ZnO-SnO₂ composite anodes in extremely thin absorber layer (ETA) solar cells" *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 646(1-2):124-132 (2010).
80. S Moon, Y Itzhaik, JH Yum, MS Zakeeruddin, G Hodes & M Graetzel "Sb₂S₃-Based Mesoscopic Solar Cell using an Organic Hole Conductor" *Journal of Physical Chemistry Letters*, 1: 1524-1527 (2010).
81. I Mora-Seró, S Giménez, F Fabregat-Santiago, E Azaceta, R Tena-Zaera & J Bisquert "Modeling and characterization of extremely thin absorber (eta) solar cells based on ZnO nanowires" *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(15): 7162-7169 (2011).

82. I Validzic and M Mitric "Colloidal synthesis of Sb_2S_3 nanorods/bars with strong preferred orientation" *Journal of Materials Letters*, 65: 1919-1922, **(2011)**.
83. N Tigau, GI Rusu & C Gheorghies "On the structural and optical properties of antimony trisulfide thin films" *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 4(4):943-948 **(2002)**.
84. P Salinas-Estevané & EM Sánchez "Preparation of Sb_2S_3 nanostructures by the ionic liquid sonochemical assisted method" *Crystal Growth and Design*, 10(9):3917-3924 **(2010)**.
85. M Lajnef and H Ezzaouia "Structural and Optical Studies of In_2S_3 Thin Films Prepared by Sulferization of Indium Thin Films" *The Open Applied Physics Journal*, 2: 23-26, (2009).
86. L Bhira, H Essaidi, S Belgacem, G Couturier, J Salardenne, N Barreau and J C Bernede "Structural and Photoelectrical Properties of Sprayed $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ Thin Films" *Physica Status Solidi A*. (181):427 **(2000)**.
87. E Kärber, I Oja, A Katerski, A Mere and M Krunks "Nanostructured solar cell prepared by chemical spray pyrolysis method" *Thin Solid Films*, 517:7, 2443-2447, **(2008)**.
88. N Sahu, B Parija and S Panigrahi "Fundamental understanding and modeling of spin coating process: A review" *Indian Journal of Physics*, 83(4), 493-502, **(2009)**.

89. J Pan, G Tonkay, A Quintero "Screen Printing Process design of experiments for fine printing of thick film ceramic substrates" *Journal of Electronics Manufacturing*, 9(203), **(1999)**.
90. M Pathan and C Lokhande "Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction method" *Bull Mater Sci Journal*, 27(2), 85-111, **(2004)**.
91. E Cohen "Coating concepts" *Practical Web Coating & Drying Advice*. Disponible en: <http://d27vj430nutdmd.cloudfront.net/16737/76965/76965-18.pdf>. Fecha de consulta: 05-09-2014.
92. B Shivaraj, H Narasimha Murthy, M Krishna and S Sharma "Investigation of Influence of Spin Coating Parameters on the Morphology of ZnO Thin Films by Taguchi Method" *International Journal of Thin Films Science and Technology*, 2, 143-154, **(2013)**.
93. R Alkire, M Kolb, J Lipkowski and P Ross "Photoelectrochemical Materials and Energy Conversion Processes" *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, 12, 185-185, **(2010)**.
94. "TiO₂ Nano Paste for Dye Sensitized Solar Cell" *Fuji Asl Solar Series*, Hoja de especificación de producto en línea. Disponible en: <http://www.predmaterials.com/sites/default/files/pdf/TiO2%20paste%20for%20Dye%20sensitized%20Solar%20Cell-English.pdf>. Fecha de consulta: 16-09-2014.
95. N Serpone, D Lawless and R Khairutdinov "Size Effects on the Photophysical Properties of Colloidal Anatase TiO₂ Particles: Size Quantization or Direct Transitions in This Indirect Semiconductor?" *Journal of Physical Chemistry*, 99, 16646-16654, **(1995)**.

96. S Bannerji and R Tyagi "Physics and Chemistry of Photocatalytic Titanium Dioxide: Visualization of bactericidal activity using atomic force microscopy" *Current Science*, 90:10, **(2006)**.
97. N Park, J Lagemaat and A Frank "Comparison of Dye-Sensitized Rutile and Anatase Based TiO_2 Solar Cells" *Journal of Physical Chemistry*, 104, 8989-8994, **(2000)**.
98. P B Ahirrao, S R Gosavi, Sanjay S Sonawane and R S Patil "Wide band gap nanocrystalline CuSCN thin films deposited by modified chemical method" *Archives of Physics Research*, 2:3, 29, **(2011)**.
99. S Ogale, V Venkatesan and M Blamire "Functional Metal Oxides" *New Science and Novel Applications*, Wiley VCH, 343, **(2013)**.
100. W Rehwald and G Harbeke "On the conduction mechanism in single crystal $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ " *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 26(8), 1309-1318, **(1965)**.
101. S Kuze, D Boulay, N Ishizawa, A Saiki and A Pring "X-ray diffraction evidence for a monoclinic form of stibnite, Sb_2S_3 , below 290 K" *American Mineralogist*, 89, 1022-1025, **(2004)**.
102. J Wei, Y Guo-Qing, K Fu-Shun, W Song "Electronic Structures and Optical Properties of CuSCN with Cu vacancies" *Journal of the Korean Physical Society*, 60(8), 1253-1257, **(2012)**.

103. R Adriano “Caracterización del voltaje V_{oc} de una celda fotovoltaica de silicio monocristalino con respecto a la temperatura” *Energía solar fotovoltaica, Universidad Nacional de Ingeniería*, 1-3, **(2008)**.
104. K Taretto, U Rau “Modeling extremely thin absorber solar cells for optimized design” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 12(8):573-91, **(2004)**.
105. E A Cruz, J E Restrepo y P D Medina “Comparación de las metodologías clásica y Taguchi del diseño experimental en un ingenio azucarero del valle del cauca” *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 12:23, 46-59, **(2008)**.

APÉNDICE A

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA SOLAR

A.1 TiO_2

El TiO_2 es un material semiconductor que presenta una gran variedad de aplicaciones, que van desde su uso en fotocátalisis hasta la preparación de cosméticos y celdas solares. Entre otros factores, esto se debe a las propiedades que presenta este material, tales como alta estabilidad, bajo costo y su no toxicidad.

Este material ha sido uno de los más investigados en las últimas décadas y se emplea con frecuencia como modelo para el estudio de otros materiales. A continuación se mencionan las propiedades más importantes que han hecho del TiO_2 el material más utilizado como semiconductor tipo n y sustrato nanoestructurado en celdas solares:

- Posee una energía de banda prohibida amplia, con un valor de 3.15 eV.
- Presenta excelentes propiedades físicas, químicas y ópticas.
- Tiene buena estabilidad química bajo la irradiación de la luz, es decir, no presenta fotocorrosión.
- No es tóxico y tiene bajo costo.
- La fase anatasa provee alta área superficial debido a su orientación cristalográfica (110), lo cual sirve para depositar con mayor facilidad la capa absorbente sobre este compuesto.
- La estructura cristalina y la morfología de este compuesto se puede controlar fácilmente por varios métodos.

El TiO_2 puede cristalizar en tres estructuras diferentes: una fase estable: rutilo (tetragonal) y dos fases metaestables: anatasa (tetragonal) y brookita (ortorrómbico).

Estas dos últimas fases se transforman irreversiblemente en rutilo a temperaturas superiores a los 700°C . En la Figura 49 se presentan las estructuras cristalinas de las fases anatasa, rutilo y brookita.

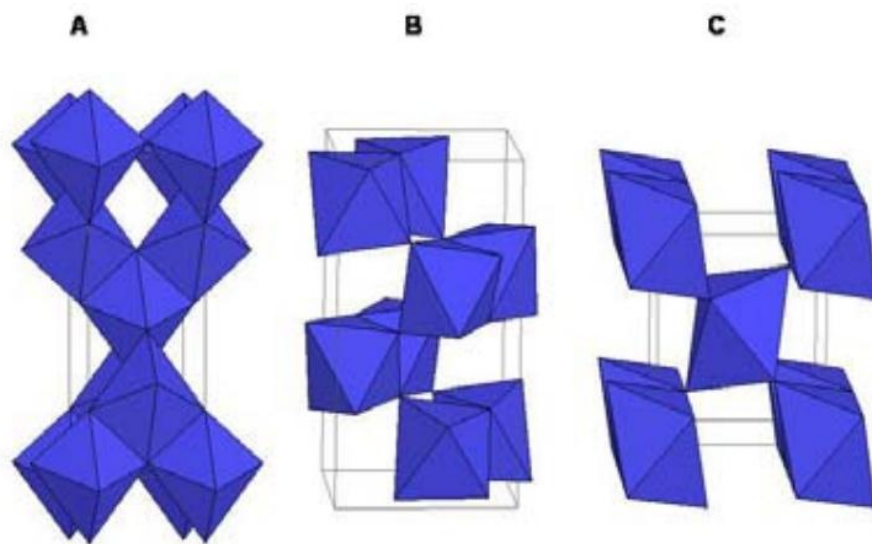


Figura 49. Esquema de las estructuras de las fases cristalinas a) anatasa, b) rutilo y c) brookita^[99].

La Tabla XV recoge algunas propiedades específicas de cada fase.

Tabla XV. Propiedades de las fases cristalinas anatasa, rutilo y brookita.

Propiedad	Anatasa	Rutilo	Brookita
Celda unitaria			
a (Å)	3.7842	4.593	5.4558
b (Å)	3.7842	4.593	9.1819
c (Å)	9.5146	2.959	5.1429
Volumen (Å ³)	136.25	62.422	257.631
Fase cristalina	Tetragonal	Tetragonal	Ortorrónica

Las dos fases más estudiadas en el campo de la energía solar han sido la anatasa y el rutilo. La anatasa presenta mayor actividad debido a un área específica superior, una diferencia de band gap y la diferencia en el tiempo de vida de los portadores. Asimismo, es sabido que en la fase rutilo ocurren con mayor frecuencia los procesos de recombinación, los cuales son desfavorables para la eficiencia de las celdas solares. En la Tabla XVI se presentan algunas de las propiedades características de los polimorfos anatasa y rutilo medidas en cristal y películas policristalinas^[99].

Tabla XVI. Valores de movilidad de electrones y masa efectiva de los polimorfos anatasa y rutilo medidos en cristal y películas policristalinas.

	Movilidad electrónica en cristal ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$)	Movilidad electrónica en una película policristalina ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$)	Masa efectiva de electrones (m_e)	Índice de refracción ($\lambda = 600 \text{ nm}$)
Rutilo	0.1-1	0.1	9-32	2.9
Anatasa	15	0.1-4	1.0	2.5

A.2 In_2S_3

El In_2S_3 es uno de los materiales más prometedores para ser utilizado como capa absorbente en celdas solares debido a su alta estabilidad, su energía de banda prohibida (2.1 eV) y su alto coeficiente de absorción (10^5 cm^{-1}).

¹). Su energía de banda prohibida de 2.1 eV lo hace más transparente en la región azul del espectro solar que el CdS.

El In_2S_3 es un semiconductor del tipo III-VI que cristaliza en tres formas alotrópicas conocidas como $\alpha\text{-In}_2\text{S}_3$, $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ y $\gamma\text{-In}_2\text{S}_3$. La fase hexagonal $\gamma\text{-In}_2\text{S}_3$ es una fase de alta temperatura y es estable por arriba de los 750°C. La fase tetragonal tipo espinela $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ es la fase más estable a temperatura ambiente y tiene una apariencia rojo oscuro, en la Figura 50 se muestra su estructura cristalina. La fase cúbica $\alpha\text{-In}_2\text{S}_3$ puede ser estable también a temperatura ambiente, dependiendo de su método de síntesis. Los parámetros de red de las fases del In_2S_3 se muestran en la Tabla XVII^[100].

Tabla XVII. *Propiedades de las fases cristalinas del In_2S_3 .*

Fase	Estructura	Constantes de red		
		a (nm)	b (nm)	c (nm)
$\alpha\text{-In}_2\text{S}_3$	Cúbica	0.761	-	0.3224
$\beta\text{-In}_2\text{S}_3$	Tetragonal	1.074	-	-
$\gamma\text{-In}_2\text{S}_3$	Hexagonal	0.3800	-	0.9044

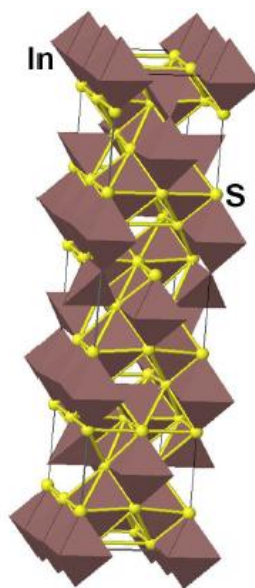


Figura 50. Estructura cristalina del $\beta\text{-In}_2\text{S}_3^{[100]}$.

A.3 Sb_2S_3

El Sb_2S_3 es un material que ha tenido una gran variedad de aplicaciones en fabricación de dispositivos optoelectrónicos, microondas, switches, cámaras de televisión, etc.

En su forma nano o policristalina, el Sb_2S_3 es un buen material absorbente para aplicaciones fotovoltaicas, presenta una energía de banda prohibida de 1.5-2.8 eV, dependiendo de su cristalinidad, y tiene un coeficiente de absorción en el orden de 10^4 cm^{-1} y un índice de refracción alto de 2.4-3.2.

El Sb_2S_3 es un sólido que cristaliza en fase puramente ortorrómbica y posee una estructura polimérica tipo listón. La fase estable a temperatura ambiente (estibnita) tiene una celda unitaria ortorrómbica con grupo espacial Pbnm ($a = 11.23$, $b = 11.31$, $c = 3.84 \text{ \AA}$)^[101]. En la Figura 51 se muestra la estructura cristalina de la fase estibnita. Su energía de banda prohibida es de 1.8 eV y absorbe en el visible y el infrarrojo cercano, lo que lo convierte en un excelente candidato para utilizarse como material absorbente en celdas solares.

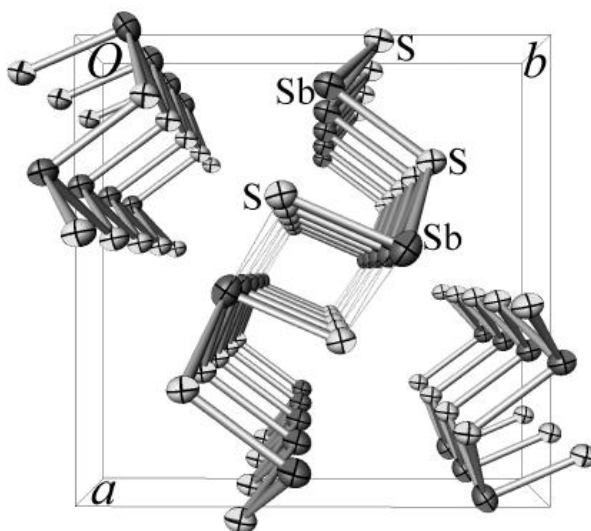


Figura 51. Estructura cristalina de la fase estibnita del Sb_2S_3 ^[101].

A.4 CuSCN

El CuSCN es uno de los materiales más prometedores para ser utilizado como semiconductor tipo p en celdas solares. Esto debido a su amplia energía de banda prohibida (3.4-3.6 eV) y su alta estabilidad química, la cual es

debida a la naturaleza polimérica de este sólido. El CuSCN es transparente en el rango visible del espectro electromagnético y presenta además, una buena conductividad de huecos. La conductividad del CuSCN se encuentra en el rango de 10^{-2} - 10^{-3} S/cm.

El CuSCN existe en dos formas polimórficas, α y β , donde la forma β es la más estable y disponible comúnmente. El β -CuSCN tiene una estructura cristalina hexagonal en la cual capas de iones de SCN separan los planos de los átomos de Cu y hay fuertes enlaces Cu-S interconectados tridimensionalmente que unen estas capas (Ver Figura 52). Los valores de constantes de red en la fase cristalina β -CuSCN son de: $a = b = 3.857 \text{ \AA}$ y $c = 10.979 \text{ \AA}$ ^[102].

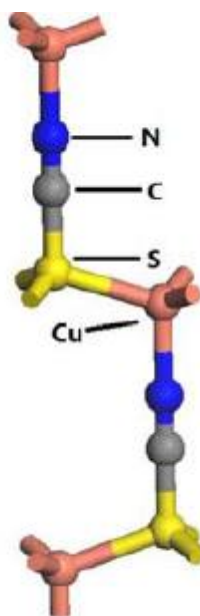


Figura 52. Estructura cristalina de la fase β -CuSCN^[102].

APÉNDICE B

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE CARGA EN UNA CELDA SOLAR ETA

En una celda solar ETA, un material absorbedor forma una heterounión interpenetrante con un material transparente tipo n y un material transparente tipo p, de manera que el material absorbedor se encuentra en medio de los dos materiales (ver Figura 11). El material tipo n es depositado usualmente sobre vidrio conductor transparente, y una delgada capa metálica sirve como contacto posterior sobre el material tipo p.

Los fotones entran en la celda a través del vidrio conductor transparente, pasan a través de la capa de material tipo n y son absorbidos en la capa de material absorbente. Un fotón absorbido excita un electrón de la capa de valencia hacia la banda de conducción del material absorbedor extremadamente delgado, lo cual deja un hueco en la banda de valencia. Los portadores de carga creados se encuentran ahora dentro del campo eléctrico creado entre los semiconductores tipo n y tipo p, y debido a la distancia reducida de transporte en el material absorbedor y al alineamiento de bandas

entre los tres materiales, los electrones son inyectados en la capa de material tipo n y los huecos en la capa de material tipo p, respectivamente. Una vez que las cargas son separadas, se transportan a sus respectivos contactos y fluyen a través de una carga externa.

Un punto clave de este dispositivo es el enorme incremento de la superficie expuesta del material absorbedor, ya que utiliza una capa de material tipo n altamente estructurado la cual permite la deposición directa del material absorbedor sobre ésta y el incremento de la superficie expuesta en un factor de 10 a 100^[66] en comparación al depósito sobre sustratos no estructurados. Debido al arreglo rugoso del dispositivo, el espesor local de la capa absorbente se ve reducido significativamente^[45]. Esta reducción en el espesor local conduce a una mejora en la probabilidad de colección de cargas, así como a una reducción en la trayectoria de transporte de las cargas en el absorbedor, limitando la probabilidad de recombinación electrón-hueco en la capa de material absorbedor.

Otro aspecto importante de la celda es la dispersión óptica que ocurre en la interfase del material absorbedor, lo cual incrementa la trayectoria óptica de los fotones en el dispositivo, mejorando de esta manera la absorción de los fotones, proceso conocido como light trapping o atrapamiento de la luz^[48]. Con el objetivo de que funcione como un buen medio de atrapamiento de la luz, la capa de material tipo n debe estar altamente estructurada, de manera que posea una longitud típica en la escala del rango de longitudes de onda de la radiación solar.

En una celda solar típica con unión p-n existen dos criterios importantes que deben cumplirse para que su funcionamiento sea eficiente. El primero es que la longitud de colección de las cargas L_c debe ser mayor que el espesor del absorbedor W , representado como $L_c/W > 1$. Este criterio debe cumplirse para asegurar que las cargas separadas no se recombinen antes de que sean colectadas. El segundo criterio especifica que el espesor del absorbedor debe aproximarse al inverso del coeficiente de absorción de luz α , y se representa matemáticamente como $L_c\alpha > 1$. El cumplimiento del segundo criterio asegura que la mayoría de la luz que pasa a través de la celda sea absorbida por ésta. El cumplimiento de los dos criterios requiere que el material tenga una alta calidad electrónica^[103]. La mayor ventaja de una celda solar ETA es que la condición $L_c\alpha > 1$ puede cumplirse más fácilmente. Debido a la morfología altamente estructurada del absorbedor, la celda solar ETA puede absorber la misma cantidad de luz que cualquier otra celda tradicional. Utilizando lo que se conoce como nanouniones paralelas extremadamente delgadas, las limitaciones de la celda se representan como $L_c/W > 1$ y $W_{tot}\alpha > 1$, donde W_{tot} es el espesor total de la película de material absorbedor, calculado como el producto del espesor local (W) por el número de nanouniones paralelas (N), $W_{tot} = NW$. Reduciendo la exigencia de la calidad electrónica de los materiales que pueden ser usados como absorbedores en la celda, un mayor número de materiales con menor calidad electrónica pueden ser utilizados. Estos materiales pueden tener otras características potenciales, tal como transparencia a la luz o menor costo.

APÉNDICE C

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Una herramienta que permite el mejoramiento de productos y de procesos es el diseño de experimentos. Una de las ventajas de estos métodos es que permiten el estudio de diferentes variables simultáneamente. Además, son empíricos y no requieren la definición de modelos matemáticos para describir situaciones físicas. En lugar de eso, involucran planes de experimentos con procedimientos definidos que agilizan la determinación de soluciones e interpretación de datos.

Un experimento es una prueba o ensayo. El experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en la variable de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

Un proceso o sistema puede ser representado por medio de una caja negra (Ver Figura 53).

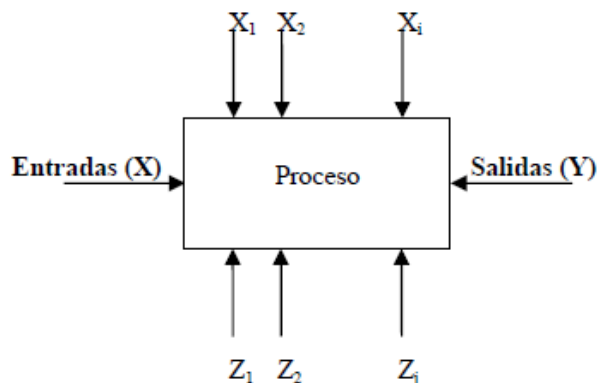


Figura 53. Esquema general de un proceso representado como una caja negra^[103].

En la Figura X, se observa la existencia de factores controlables X_1 , X_2 , , X_i ; factores no controlables Z_1 , Z_2 , , Z_i ; entradas y una respuesta o salida del sistema. Entre los objetivos del experimento pueden incluirse:

- Determinar cuáles variables (factores) tienen mayor influencia en la salida del proceso (Y).
- Determinar el mejor valor de las X que influyen en la salida del proceso, de manera que Y tenga un valor cercano al valor deseado.
- Determinar el mejor valor de las X que influyen en Y de modo que su variabilidad sea pequeña.
- Determinar el mejor valor de las X que influyen en Y, de modo que se minimicen los efectos de los factores no controlables Z.

La idea de diseñar productos o procesos cuyo desempeño sea insensible a las condiciones ambientales (robustez del sistema) y realizar esto en las etapas de diseño a través del uso de diseño de experimentos ha sido la piedra angular de la metodología Taguchi. Los diseños experimentales de Taguchi están basados en arreglos ortogonales y se hicieron populares por el ingeniero Genichi Taguchi. Normalmente se identifican con un nombre como L8, que indica un arreglo con 8 corridas. Los diseños experimentales clásicos también están basados en arreglos ortogonales, pero se identifican con un exponente para indicar el número de variables, así un diseño experimental clásico 2^3 también tiene 8 corridas.

Los diseños generados por los dos métodos parecen ser similares, y de hecho lo son. La metodología de Taguchi se enfatiza en:

- Diseño robusto: es la búsqueda mediante el juego de las condiciones para lograr un comportamiento del proceso óptimo.
- Minimización de la función de pérdida: es la minimización de la pérdida económica debido a las corridas en condiciones no óptimas.
- Maximización de la señal razón a ruido: es el alcance de los mejores objetivos del proceso bajo las condiciones no controlables (ruido).
- Selección del diseño experimental para examinar las gráficas lineales, que permiten además la investigación de las interacciones de los efectos deseados basados en el proceso conocido.

La metodología clásica enfatiza en:

- Experimentación secuencial para modelar el comportamiento del proceso (por ejemplo, para desarrollar modelos empíricos del proceso incluyendo el efecto de los factores de ruido).
- Predicción del comportamiento futuro del proceso, incluyendo los efectos óptimos de los modelos empíricos.
- Investigación y aislamiento de factores que afectan a la media y a la varianza independientemente.
- Selección del diseño experimental, considerando las salidas, esto, en corridas de una fracción de un diseño factorial completo, por ejemplo, un diseño 2^{8-4} , investiga los efectos de los 8 factores en 16 corridas, y las salidas son conocidas antes de correr el experimento. La experimentación adicional puede ser requerida para identificar claramente los efectos de sus interacciones.

El empleo de estas estrategias es sencillo, su aplicación no es costosa y el tiempo necesario para desarrollarlas es relativamente corto y la información necesaria que permite aplicarla en la solución de problemas es fácil de entender. Es por ello que el uso de estas estrategias en el sector privado o educativo disminuye los costos de manufactura, mejora la calidad de los productos y reduce el tiempo para la introducción de nuevos productos o procesos^[104].

APÉNDICE D

ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

C.1 Diseño de experimentos Taguchi con arreglo L12

C.1.1 Análisis de varianza de un factor

C.1.1.1 Velocidad de depósito

Tabla XVIII. Análisis de varianza del factor velocidad de depósito.

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
1000 rpm	6	0.067	0.011166667	1.49667E-05		
3000 rpm	6	0.038	0.006333333	1.54667E-05		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	7.00833E-05	1	7.00833E-05	4.605695509	0.05744222	4.964602744
Dentro de los grupos	0.000152167	10	1.52167E-05			
Total	0.00022225	11				

$F < F$ crítico, por lo tanto, la velocidad de depósito no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

C.1.1.2 Tiempo de rotación

Tabla XIX. *Análisis de varianza del factor tiempo de rotación.*

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
10 s	6	0.424	0.070666667	0.000142667		
30 s	6	0.413	0.068833333	0.000170967		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.00833E-05	1	1.00833E-05	0.064300138	0.804961334	4.964602744
Dentro de los grupos	0.001568167	10	0.000156817			
Total	0.00157825	11				

$F < F$ crítico, por lo tanto, el tiempo de rotación no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

C.1.1.3 Cantidad de solución de precursor

Tabla XX. *Análisis de varianza del factor cantidad de solución de precursor.*

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
0.5 mL	6	0.43	0.07166667	0.00018467		
1 mL	6	0.407	0.06783333	0.00012217		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	4.4083E-05	1	4.4083E-05	0.28734383	0.60364586	4.96460274
Dentro de los grupos	0.00153417	10	0.00015342			
Total	0.00157825	11				

$F < F$ crítico, por lo tanto, la cantidad de solución del precursor no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

C.1.1.4 Perfil de calcinación

Tabla XXI. *Análisis de varianza del factor perfil de calcinación.*

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
450°C-30min	6	0.418	0.06966667	0.00016627
450°C-60min	6	0.419	0.06983333	0.00014937

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	8.3333E-08	1	8.3333E-08	0.00052804	0.98211901	4.964602744
Dentro de los grupos	0.00157817	10	0.00015782			
Total	0.00157825	11				

$F < F$ crítico, por lo tanto, el perfil de calcinación no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

C.1.1.5 Relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:

dietanolamina

Tabla XXII. *Análisis de varianza del factor relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina.*

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
2•1	4	0.335	0.08375	0.00002625
1•1	4	0.274	0.0685	3E-06
1•2	4	0.228	0.057	1.6667E-05

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.0014405	2	0.00072025	47.0580762	1.7144E-05	4.25649473
Dentro de los grupos	0.00013775	9	1.5306E-05			
Total	0.00157825	11				

$F > F$ crítico, por lo tanto, la relación estequiométrica tetraisopropóxido de titanio:dietanolamina tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

C.2 Diseño de experimentos Taguchi con arreglo L9

C.2.1 Análisis de varianza de un factor

C.2.1.1 Concentración de la sal metálica

Tabla XXIII. Análisis de varianza del factor concentración de la sal metálica.

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0.1 M	3	0.557	0.185666667	0.000325333		
0.2 M	3	0.64	0.213333333	1.33333E-06		
0.3 M	3	0.708	0.236	6.4E-05		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.003812667	2	0.001906333	14.6390785	0.004919671	5.14325285
Dentro de los grupos	0.000781333	6	0.000130222			
Total	0.004594	8				

$F > F$ crítico, por lo tanto, la concentración de la sal metálica tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

C.2.1.2 Tiempo de inmersión

Tabla XXIV. *Análisis de varianza del factor tiempo de inmersión.*

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
5 min	3	0.609	0.203	0.001021
9 min	3	0.637	0.212333333	0.000602333
14 min	3	0.659	0.219666667	0.000464333

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.000418667	2	0.000209333	0.300814306	0.750758893	5.14325285
Dentro de los grupos	0.004175333	6	0.000695889			
Total	0.004594	8				

$F < F$ crítico, por lo tanto, el tiempo de inmersión no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

C.2.1.3 Temperatura de calcinación

Tabla XXV. *Análisis de varianza del factor temperatura de calcinación.*

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
100°C	3	0.615	0.205	0.001227
150°C	3	0.645	0.215	0.000813
200°C	3	0.645	0.215	0.000157

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.0002	2	0.0001	0.136549841	0.874998251	5.14325285
Dentro de los grupos	0.004394	6	0.000732333			
Total	0.004594	8				

$F < F$ crítico, por lo tanto, la temperatura de calcinación no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

C.2.1.4 Tiempo de calcinación

Tabla XXVI. *Análisis de varianza del factor tiempo de calcinación.*

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
30 min	3	0.625	0.208333333	0.001506333		
60 min	3	0.627	0.209	0.000427		
90 min	3	0.653	0.217666667	0.000282333		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.000162667	2	8.13333E-05	0.110124868	0.897491381	5.14325285
Dentro de los grupos	0.004431333	6	0.000738556			
Total	0.004594	8				

$F < F$ crítico, por lo tanto, el tiempo de calcinación no tiene un efecto significativo sobre la absorbancia.

APÉNDICE D

GLOSARIO DE TÉRMINOS DE ENERGÍA SOLAR

Ampere: El flujo de corriente eléctrica se mide en amperes. Un ampere representa la cantidad de corriente que fluye en un circuito en el cual hay una tensión de un volt sobre una resistencia de un ohm.

Banda de valencia: Se denomina banda de valencia al más alto de los intervalos de energías electrónicas (o bandas) que se encuentra ocupado por electrones en el cero absoluto.

Banda de conducción: Es el intervalo de energías electrónicas que estando por encima de la banda de valencia, permite a los electrones sufrir aceleraciones por la presencia de un campo eléctrico externo, y por tanto, permite la presencia de corrientes eléctricas.

Celda solar: Elemento que transforma la luz solar (fotones) en electricidad.

Condiciones de prueba estándar: Condiciones en las cuales se prueban las celdas solares en el laboratorio (1 KWh/m² de radiación solar, 25°C de temperatura y un espectro solar correspondiente a una masa de aire de 1.5).

Constante solar: Cantidad de energía solar que incide sobre una superficie de 1 m^2 por segundo cuando ésta se encuentra en el tope de la atmósfera a la distancia media Sol-Tierra. Su valor es de aproximadamente 1.36 KW/m^2 .

Corriente de corto circuito: Corriente que se mide en condiciones de corto circuito en los terminales de una celda.

Corriente de máxima potencia: Corriente correspondiente al punto de máxima potencia.

Diodo: Dispositivo semiconductor que permite que la corriente eléctrica fluya a través de él en una sola dirección.

Diodo pin: Se llama diodo pin a una estructura de tres capas, siendo la intermedia un semiconductor intrínseco, y las externas, una de tipo p y la otra de tipo n.

Eficiencia de conversión: Es la relación entre la energía eléctrica producida por una celda y la energía de la radiación solar incidente bajo condiciones estándares de medición.

Hueco: Es la ausencia de un electrón en la banda de valencia.

Silicio amorfo: La estructura cristalina de este material no tiene un patrón ordenado.

Silicio monocristalino: Está hecho de un solo cristal de silicio de muy alta pureza.

Silicio policristalino: La estructura cristalina de este material está constituida de varios cristales.

Volt: Es la unidad de medición de la diferencia de potencial entre dos puntos.

Voltímetro: Dispositivo para la medición de la diferencia de potencial entre dos puntos en un circuito eléctrico.

Voltaje de circuito abierto: Se refiere a la diferencia de voltaje entre dos puntos en un circuito, cuando los dos puntos están eléctricamente desconectados uno de otro.

Watt: Unidad fundamental de medición de energía ($1 \text{ Watt} = 1 \text{ joule/segundo}$ o también $1 \text{ Watt} = 1 \text{ volt} \times 1 \text{ ampere}$).

APÉNDICE E

MANEJO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS

Residuo	Cantidad	Contenedor	Descripción
Etanol de lavado	30 mL	A	Solventes y soluciones de sustancias orgánicas no halogenadas
Tioacetamida en etanol	30 mL	A	Solventes y soluciones de sustancias orgánicas no halogenadas
CuSCN en sulfuro de propilo	5 mL	D	Sales en solución
SbCl ₃ en etanol	30 mL	D	Sales en solución
InCl ₃ en etanol	30 mL	D	Sales en solución
In ₂ S ₃	0.5 g	I	Sólidos inorgánicos
Sb ₂ S ₃	0.5 g	I	Sólidos inorgánicos
Sustratos de vidrio	5	K	Desechos de vidrio

PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES

Artículos

1. *“Comparative study of Sb_2S_3 , Bi_2S_3 and In_2S_3 deposition on TiO_2 by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method”* A.M. Huerta-Flores, N.A. García-Gómez, S. de la Parra and E.M. Sánchez-Cervantes. Journal of Material Science in Semiconductor Processing (Enviado 2014).
2. *“Fabrication and characterization of nanostructured $TiO_2/In_2S_3-Sb_2S_3/CuSCN$ eta solar cell”* A.M. Huerta-Flores, N.A. García-Gómez, S. de la Parra and E.M. Sánchez-Cervantes. Journal of Material Science in Semiconductor Processing (Enviado 2014).

Presentaciones orales

1. *“Nanostructured assembling of iron and antimony sulfides on titanium dioxide”* A.M. Huerta-Flores, N.A. García-Gómez, F. Garza-Méndez and E.M. Sánchez-Cervantes. Congreso Internacional de Química e Ingeniería Verde 2012.

Presentaciones en póster

1. *“Successive ionic layer adsorption and reaction deposition of iron and antimony sulfides on TiO_2 ”* A.M. Huerta-Flores, N.A. García-Gómez and E.M. Sánchez-Cervantes. XXI International Materials Research Congress 2012.
2. *“Comparative study of Sb_2S_3 , Bi_2S_3 and In_2S_3 deposition on TiO_2 by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method”* A.M. Huerta-Flores, N.A. García-Gómez, D.I. García-Gutierrez and E.M. Sánchez-Cervantes. XXIII International Materials Research Congress 2014.

3. *“Comparative study of Sb_2S_3 , Bi_2S_3 and In_2S_3 deposition on nanostructured TiO_2 by solution chemistry”* A.M. Huerta-Flores, N.A. García-Gómez, S. de la Parra and E.M. Sánchez-Cervantes. Congreso Nacional de Fotosíntesis Artificial 2014.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Ali Margot Huerta Flores

Candidato para el Grado de

Maestro en Ciencias con Orientación en Química de Materiales

Tesis: ESTUDIO DEL SISTEMA $\text{In}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3$ EN CELDAS SOLARES DE CAPA EXTREMADAMENTE DELGADA

Campo de Estudio: Química de los Materiales y Energías Alternas

Biografía:

Datos personales: Nacida en Monterrey, Nuevo León, el 9 de Octubre de 1986, hija de Carlos Huerta Rodríguez y María Julia Flores Medellín.

Educación:

Egresada de la Universidad Autónoma de Nuevo León, grado obtenido Licenciado en Química Industrial con mención honorífica, segundo lugar de la generación.

Experiencia profesional:

Químico analista y asistente de investigación en la empresa Biocombustibles Internacionales desde Marzo de 2008 a Octubre de 2010, siendo responsable del análisis de calidad de combustibles y biodiesel, así como del desarrollo y prueba de nuevos combustibles.

Especialista en el uso del Difractómetro de Rayos X, Analizador de Distribución de Tamaño de Partícula, Analizador Térmico Diferencial, Espectrofotómetro de Infrarrojo, Espectrofotómetro de Ultravioleta Visible y Espectrofotómetro de Fluorescencia, desde Enero de 2013 a la fecha en el Departamento de Ecomateriales y Energía del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL.